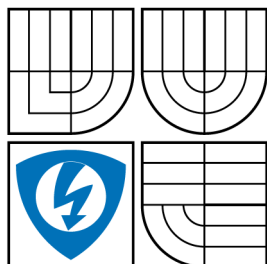


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV FYZIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF PHYSICS

CHARAKTERIZACE SEKUNDÁRNĚ VYTVOŘENÝCH STRUKTUR V PN PŘECHODECH KŘEMÍKOVÝCH SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

CHARACTERIZATION OF SECONDARY CREATED STRUCTURES IN PN
JUNCTIONS OF SILICON SOLAR CELLS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JIŘÍ ŠICNER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. PAVEL KOKTAVÝ, CSc., Ph.D.

BRNO 2015

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studiem a charakterizací sekundárně vytvořených struktur v PN přechodech krystalických křemíkových solárních článků. Pojmeme sekundárně vytvořené struktury jsou myšleny struktury vytvořené za účelem potlačení negativního vlivu lokálních defektů a hran na funkci solárního článku. To jsou v prvním případě především laserem vytvořené zářezy sloužící pro izolaci hran solárních článků. Dále pak sekundárně vytvořenou strukturou rozumíme úpravu defektní oblasti pomocí odprašování fokusovaným iontovým svazkem. Teoretická část práce se zabývá stručným úvodem do problematiky solárních článků, je zde uvedena fyzikální podstata solárního článku a technologie spojené s problematikou solárních článků. Experimentální část začíná popisem použitých experimentálních metod. Pro nedestructivní diagnostiku byly použity metody jak elektrické (VA charakteristiky, šumové charakteristiky), tak i metody optické (měření lokálního vyzařování – CCD kamera, termokamera, lock-in termografie). Dále pak bylo využito skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) vybaveného technologií odprašování pomocí iontového svazku (FIB). Postupně jsou zde uvedeny jednotlivé výsledky charakterizace laserem vytvořených struktur. Tyto dílčí výsledky jsou zakomponovány do vytvořené komplexní metodiky pro charakterizaci laserem vytvořených struktur. Experimentální část je pak zakončena prezentací výsledků z výzkumu využití technologie fokusovaného svazku iontů pro odprašování defektních oblastí solárních článků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Křemíkové solární články, nedestructivní diagnostika, lokální defekty, laserová izolace, odprašování pomocí FIB, náhradní modely.

ABSTRACT

This thesis describes the study and characterization of secondary created structures in PN junction of silicon solar cells. Secondary created structure is the term which means the structures created for the purpose of suppressing the negative influence of local defects and edges of the solar cell. This means in particular laser notches used to isolate the edges. Furthermore, the secondary created structure means modification defective area using focused ion beam milling. Theoretical part of this work deals with short introduction to the topic of solar cells. There are mentioned the physical nature of the solar cell and the technology associated with the issue of solar cells. Experimental section begins with a description of the experimental methods. For diagnostic methods were used both electrical (UI characteristics, noise characteristics) and optical methods (measuring local radiation - CCD camera, thermal imager, lock-in thermography). Furthermore, there was also used a scanning electron microscope (SEM) equipped with technology using Focused Ion Beam (FIB). Sequentially there are presented individual results of characterization of created structures by laser. These partial results are incorporated into a comprehensive methodology developed for characterizing laser-created structures. The experimental part is finished by a presentation of the results of the research use of focused ion beam technology for sputtering defective areas of solar cells.

KEYWORDS

Silicon solar cells, nondestructive diagnostics, local defects, laser isolation, FIB milling, replacement models.

ŠICNER, Jiří *Charakterizace sekundárně vytvořených struktur v PN přechodech křemíkových solárních článků*: dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav fyziky, 2015. 108 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Pavel Koktavý, CSc., Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Charakterizace sekundárně vytvořených struktur v PN přechodech křemíkových solárních článků“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího doktorské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené doktorské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této doktorské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu dizertační práce panu prof. Ing. Pavlovi Koktavému, CSc., Ph.D. za odborné vedení v průběhu celého doktorského studia, podnětné návrhy, trpělivost a ochotu.

Velice rád bych poděkoval také panu Ing. Robertovi Macků, Ph.D. a Ing. Pavlu Škarvadovi, Ph.D. za veškerou technickou podporu a konzultace při řešení dizertační práce.

Předkládaná dizertační práce vznikla za podpory CEITEC (Středoevropský technologický institut, číslo projektu CZ.1.05/1.1.00/02.0068).

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této doktorské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	14
Seznam symbolů, veličin a zkratk	16
Úvod	19
1 Cíle dizertační práce	21
2 Problematika solárních článků	23
2.1 Historie solárních článků	23
2.2 Fyzikální podstata solárního článku	24
2.2.1 Struktura křemíkového solárního článku	24
2.2.2 Základní princip	25
2.2.3 PN přechod solárního článku	26
2.2.4 Elektrická charakteristika ideálního solárního článku	27
2.2.5 Elektrická charakteristika solárního článku v praxi	29
2.3 Typy defektů křemíkových solárních článků	32
3 Technologie spojené s výzkumem solárních článků	34
3.1 Diagnostické metody	34
3.1.1 Elektrické metody	34
3.1.2 Optické metody	34
3.2 Laserové procesy a jejich využití na křemíkových solárních článcích	35
3.3 Elektronová mikroskopie a technologie FIB	36
3.3.1 Vývoj technologie FIB	37
3.3.2 Základní parametry systému FIB	37
3.3.3 Interakce iontu s povrchem materiálu	39
4 Použité experimentální metody	42
4.1 Měření VA charakteristik mezi kontakty solárního článku	42
4.1.1 Kontaktovací stanice Cascade MT150	42
4.1.2 Analyzátor polovodičových součástek Keithley 4200-SCS	43
4.1.3 Schéma zapojení	44
4.2 Měření vyzařování z PN přechodu solárních článků	45
4.2.1 Měření vyzařování ve viditelném spektru	45
4.2.2 Měření vyzařování v infračerveném spektru	46

4.3	Měření VA charakteristik solárního článku při osvětlení	47
4.4	Elektronový mikroskop Lyra 3 FIB-SEM	48
5	Diagnostika a charakterizace laserem vytvořených struktur	50
5.1	Technické parametry použitého laseru	50
5.2	Studium hran solárních článků po řezání laserem	51
5.3	Charakterizace laserem vytvořených struktur určených pro izolaci hran	58
5.4	Studium rezistivity laserem modifikovaných oblastí	66
6	Metodika pro charakterizaci laserem vytvořených struktur	73
6.1	Podstata použitého přístupu	73
6.2	Příprava vzorků	74
6.3	Stanovení náhradních modelů pro určení velikosti odporu oblasti la- serového zářezu	74
6.4	Stanovení veličin pro hodnocení kvality laserového opracování	78
6.5	Vyhodnocení kvality laserového zářezu	79
7	Využití technologie FIB pro pasivaci defektních oblastí	80
7.1	Příprava vzorků a použité experimentální metody	80
7.2	Vybrané dosažené výsledky	81
	Závěr a zhodnocení práce	96
	Literatura	98
	Autorské a spoluautorské publikace	105
	Životopis autora	107

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Vývoj dosažených účinností pro různé technologie solárních článků v laboratorních podmínkách [1].	23
2.2	Znázornění průřezu solárním článkem.	25
2.3	Model PN přechodu solárního článku. a) Schéma energetických hladin v polovodiči typu P a N. b) Vyrovnání Fermiho energie a ohyb pásů v místě PN přechodu. c) Osvětlený PN přechod, který není zapojen v elektrickém obvodu.	27
2.4	Náhradní obvod ideálního solárního článku (plné čáry), součástky reprezentující parametry reálného článku jsou zobrazeny přerušovanou čarou.	28
2.5	VA charakteristika ideálního solárního článku a výkon generovaný článkem.	28
2.6	VA charakteristika PN přechodu v temném prostředí a při osvětlení.	30
2.7	Vliv sériového (vlevo) a paralelního (vpravo) odporu na VA charakteristiku solárního článku.	31
2.8	Parazitní energiové hladiny vytvořené různými příměsi v zakázaném pásu křemíku.	33
2.9	Ukázka procesního defektu solárního článku – odštípnutý vrchol pyramidové struktury solárního článku.	33
3.1	Schématický diagram procesu odprašování a interakce iontu s materiálem.	39
3.2	Příklad použití technologie FIB: řezání uhlíkových vláken (a), izolace lokálního defektu na křemíkovém solárním článku (b).	40
4.1	Kontaktovací stanice Cascade MT150.	42
4.2	Analyzátor Keithley 4200-SCS.	43
4.3	Blokové schéma zapojení měřicí aparatury (DUT – Device Under Test).	44
4.4	Snímek z CCD kamery, vzorek A3606-11, $U_R = 25,4 \text{ V}$, $I_R = 40 \text{ mA}$, čas expozice 60 s, vlevo snímek z programu SIMS, vpravo pak tentýž snímek zpracovaný v programu MATLAB.	45
4.5	Ukázka snímků z termokamery Micro-Epsilon TIM 160, vzorek PL11, $U_R = 4 \text{ V}$, vlevo je snímek přímo z kamery, vpravo pak zobrazení v režimu lock-in.	47
4.6	Ukázka snímků z termokamery Micro-Epsilon TIM 160, vzorek PL11, $U_R = 14 \text{ V}$, vlevo je snímek přímo z kamery, vpravo zobrazení v režimu lock-in.	47
4.7	NI PXI-4130 Power SMU.	48
4.8	Elektronový mikroskop Lyra 3 FIB-SEM od firmy Tescan na UFYZ.	49

5.1	Detail vyzařování defektu na hraně solárního článku, vzorek K22, CCD kamera (vlevo), detail defektu na hraně solárního článku, vzorek K22 (vpravo).	51
5.2	Ukázka vzorku s defekty nacházejících se na hraně solárního článku, snímek vlevo zachycený CCD kamerou, $U_R = 6\text{ V}$, vpravo pak snímek pořízený termokamerou, $U_R = 6\text{ V}$	52
5.3	Závislost teploty v defektní oblasti na závěrném napětí, vzorek K22. .	52
5.4	Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 1 ₂ , $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů mezi kontakty viz tab. 5.4.	54
5.5	Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 2 ₂ , $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů mezi kontakty viz tab. 5.5.	54
5.6	Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 3 ₁ , $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů viz tab. 5.6.	55
5.7	Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 4 ₂ , $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů mezi kontakty viz tab. 5.7.	56
5.8	Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 5 ₁ , $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů mezi kontakty viz tab. 5.8.	57
5.9	Ukázka připraveného vzorku pro charakterizaci laserových zářezů, vzorek PL45.	58
5.10	Vyzařování ve viditelném (vlevo) a v infračerveném spektru (vpravo) ze vzorku ID1 ₁ při elektrickém buzení článků v závěrném směru, $U_R = 14,4\text{ V}$, $I_R = 20\text{ mA}$	60
5.11	VA charakteristiky v závěrném směru u vybraných vzorků ze sady ID1, logaritmické zobrazení, měřeno v temném prostředí při teplotě 27°C	60
5.12	Měření odporu mezi sousedními kontakty solárního článku s realizovanými laserovými zářezy, sada vzorků ID1, měřeno v temném prostředí při teplotě 27°C	61
5.13	Vyzařování ve viditelném (vlevo) a v infračerveném spektru (vpravo) ze vzorku IO1 ₂ při elektrickém buzení článků v závěrném směru, $U_R = 15,58\text{ V}$, $I_R = 20\text{ mA}$	62
5.14	VA charakteristiky v závěrném směru u vybraných vzorků ze sady IO1, logaritmické zobrazení, měřeno v temném prostředí při teplotě 27°C	62

5.15	Měření odporu mezi sousedními kontakty solárního článku s realizovanými laserovými zářezy, sada vzorků IO1, měřeno v temném prostředí při teplotě 27 °C.	63
5.16	Vyzařování ve viditelném (vlevo) a v infračerveném spektru (vpravo) ze vzorku IO2 ₃ při elektrickém buzení článků v závěrném směru, $U_R = 16,04 \text{ V}$, $I_R = 20 \text{ mA}$	64
5.17	VA charakteristiky v závěrném směru u vybraných vzorků ze sady IO2, logaritmické zobrazení, měřeno v temném prostředí při teplotě 27 °C.	64
5.18	Měření odporu mezi sousedními kontakty solárního článku s realizovanými laserovými zářezy, sada vzorků IO2, měřeno v temném prostředí při teplotě 27 °C.	65
5.19	Detail laserového zářezu, vzorek D283, pohled shora (vlevo), profil zářezu (vpravo).	66
5.20	Schéma čtyřbodové metody měření rezistivity.	67
6.1	Schéma oblasti mezi dvěma sousedními horními kontakty článku bez laserového opracování s vyznačením prvků náhradního schématu. . . .	75
6.2	Náhradní schéma oblasti článku bez opracování laserem mezi dvěma sousedními horními kontakty.	75
6.3	Schéma oblasti mezi dvěma sousedními horními kontakty laserově opracovaného článku s vyznačením prvků náhradního schématu. . . .	76
6.4	Náhradní schéma oblasti mezi dvěma sousedními horními kontakty laserově opracovaného článku.	77
7.1	Ukázka topografie povrchu na mikroskopu SEM: struktura při přeskocení alkalického leptání („stolová“) (a), standardní pyramidální struktura (b).	81
7.2	Měření vyzařování ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 6 \text{ V}$, $I_R = 1,5 \text{ mA}$: Vyzařování ve viditelném spektru (CCD kamera) (a), Vyzařování v infračerveném spektru (termokamera) (b).	82
7.3	Topografie defektní oblasti vzorku vf2a pořízená mikroskopem SNOM. . . .	82
7.4	Obraz zaznamenaný fotonásobičem v uspořádání pro reflexní měření - stínový obraz.	83
7.5	Topografie vzorku solárního článku, vf2a, na topografii vzorku lze vidět namapovaný stín hrotu určený pro lokalizaci vyzařování.	83
7.6	Přehledový snímek pro určení pozice defektní oblasti na vzorku vf2a. . . .	84
7.7	Ukázka shody mezi snímky z mikroskopu SNOM a SEM.	84
7.8	Detail defektní oblasti „C“ na vzorku vf2a, snímek pořízený SEM. . . .	85

7.9	Detail izolace defektní oblasti solárního článku pomocí odprášení iontovým svazkem, velikost stran izolačního zářezu $30 \times 30 \mu\text{m}$ a hloubka $2 \mu\text{m}$	85
7.10	Detail izolace defektní oblasti solárního článku pomocí odprášení iontovým svazkem, plocha izolačního čtverce $40 \mu\text{m}^2$ a hloubka $2 \mu\text{m}$. . .	86
7.11	Měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 6 \text{ V}$: Vzorek před odprášením defektní oblasti „C“ $I_R = 1,5 \text{ mA}$ (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „C“ iontovým svazkem $I_R = 1,3 \text{ mA}$ (b).	87
7.12	Měření vyzařování v infračerveném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 6 \text{ V}$: Snímek vzorku před odprášením defektní oblasti „C“, $I_R = 1,5 \text{ mA}$ (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „C“ iontovým svazkem $I_R = 1,3 \text{ mA}$ (b).	87
7.13	Voltampérová charakteristika vzorku vf2a v závěrném směru, měřeno v temném prostředí, $T = 293,15 \text{ K}$	88
7.14	Zatěžovací charakteristika solárního článku při konstantním osvětlení, vzorek vf2a, měření před odstraněním defektní oblasti (modrá křivka), měření po odstraněním defektní oblasti (červená křivka), $T = 298,15 \text{ K}$	88
7.15	Měření vyzařování ze závěrně polarizovaného vzorku vf1a, $U_R = 4 \text{ V}$, $I_R = 2,5 \text{ mA}$: Vyzařování ve viditelném spektru (CCD kamera) (a), Vyzařování v infračerveném spektru (termokamera) (b).	89
7.16	Defektní oblast „B“ vzorku vf1a na mikroskopu SEM: pohled shora (a), pohled z úhlu 55° (b).	90
7.17	Defektní oblast „B“ vzorku vf1a odprášená iontovým svazkem: pohled shora (a), pohled z úhlu 55° (b).	90
7.18	Měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf1a, $U_R = 4 \text{ V}$: Vzorek před odprášením defektní oblasti „B“, $I_R = 2,5 \text{ mA}$ (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „B“ iontovým svazkem, $I_R = 1 \text{ mA}$ (b).	91
7.19	Měření vyzařování v infračerveném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 4 \text{ V}$: Vzorek před odprášením defektní oblasti „B“, $I_R = 2,5 \text{ mA}$ (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „B“ iontovým svazkem, $I_R = 1 \text{ mA}$ (b).	91
7.20	Voltampérová charakteristika vzorku vf1a v závěrném směru, měřeno v temném prostředí, $T = 293,15 \text{ K}$	92
7.21	Měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf1a, $U_R = 6,4 \text{ V}$, $I_R = 0,7 \text{ mA}$	93

7.22 Defektní oblast „A“ vzorku sxx4: detail defetu (a), odprášená defektní oblast (b).	93
7.23 Měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf1a, $U_R = 6,4 \text{ V}$: Snímek vzorku před odprášením defektní oblasti „A“, $I_R = 0,7 \text{ mA}$ (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „A“ iontovým svazkem, $I_R = 0,18 \text{ mA}$ (b).	94
7.24 Voltampérová charakteristika vzorku sxx4 v závěrném směru, měřeno v temném prostředí, $T = 293,15 \text{ K}$	94

SEZNAM TABULEK

2.1	Procentuální zastoupení jednotlivých ztrátových mechanismů z celkových ztrát v křemíkových solárních článcích v běžných podmínkách.	31
5.1	Technické parametry laserového zdroje.	50
5.2	Parametry pulzů laserového zdroje.	51
5.3	Parametry laseru pro naříznutí hrany před dolomením.	53
5.4	Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 1.	53
5.5	Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 2.	54
5.6	Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 3.	55
5.7	Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 4.	55
5.8	Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 5.	56
5.9	Parametry použitého laseru pro realizaci laserových zářezů na sady vzorků ID1, IO1 a IO2.	59
5.10	Hodnoty odporu měřených mezi sousedními kontakty u vybraných vzorků ze sady ID1.	61
5.11	Hodnoty odporu měřených mezi sousedními kontakty u vybraných vzorků ze sady IO1.	63
5.12	Hodnoty odporu měřených mezi sousedními kontakty u vybraných vzorků ze sady IO2.	65
5.13	Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek bez difúze opracovaný laserem v různých bodech.	68
5.14	Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek s difúzí opracovaný laserem v různých bodech.	68
5.15	Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek bez difúze bez opracování laserem v různých bodech.	69
5.16	Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek s difúzí bez opracování laserem v různých bodech.	69
5.17	Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek s difúzí bez opracování laserem v různých bodech.	70
5.18	Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek bez difúze bez opracování laserem v různých bodech.	70
5.19	Naměřené hodnoty rezistivity v různých bodech pro vzorek s difúzí odleptaný ze spodní strany.	71

5.20	Naměřené hodnoty rezistivity v různých bodech pro vzorek bez difúze odleptaný ze spodní strany.	71
5.21	Průměrné hodnoty rezistivity pro jednotlivé vzorky.	72

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

c	Rychlost světla
e	Elementární náboj elektronu
E_A	Energetická hladina akceptorů
E_c	Energetická hladina vodivostního pásu
E_D	Energetická hladina donorů
E_F	Fermiho energetická hladina
E_g	Šířka zakázaného pásu
E_i	Intrinzická hladina energie
E_v	Energetická hladina valenčního pásu
f	Frekvence
FF	Fill faktor
h	Planckova konstanta
I_0	Saturační proud
I_m	Proud při odběru maximálního výkonu
I_{ph}	Proud generovaný solárním článkem
I_{sc}	Proud nakrátko
I_R	Závěrný proud
L	Délka laserem vytvořené rýhy
N_A	Koncentrace akceptorů
N_D	Koncentrace donorů
n_i	Intrinzická koncentrace
P_{max}	Maximální výkon
R_C	Odpor styku kov-polovodič
R_E	Odpor popisující svodový proud tekoucí přes hranu solárního článku

R_{CH}	Odpor laserem vytvořeného kanálu
R_M	Odpor kontaktu solárního článku
R_n	Odpor polovodiče N
R_P	Paralelní odpor solárního článku
R_p	Odpor polovodiče P
R_S	Sériový odpor solárního článku
T	Absolutní teplota
U_D	Difúzní napětí
U_m	Napětí při odběru maximálního výkonu
U_{oc}	Napětí naprázdno
U_P	Fotovoltaické napětí
U_{VN}	Vnější připojené napětí
U_R	Závěrné napětí
Δn	Koncentrace nadbytečných nosičů
η	Konverzní účinnost solárního článku
λ	Vlnová délka
CCD	Charged-Coupled Device
DUT	Device Under Test
FIB	Focused Ion Beam
FIM	Field Ion Microscopy
KITE	Keithley Interactive Test Environment
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LBIC	Light Beam Induced Voltage
LFC	Laser-Fired Contacts
LGBC	Laser-Grooved Buried Contacts

LMIS	Liquid Metal Ion Source
MATLAB	MATrix LABoratory
M/EWT	Metal/Emitter Wrap-Through
NI	National Instruments
NOBIC	Near-field Optical Beam-Induced Current
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation
SEM	Scanning Electron Microscope
SNOM	Near Field Scanning Optical Microscopy
SMU	Source Measure Unit

ÚVOD

Zvyšující se energetické nároky společnosti a s tím související problémy se znečištěním životního prostředí vedou k hledání alternativních zdrojů elektrické energie. Mezi v poslední době velmi diskutované alternativní zdroje patří solární fotovoltaické systémy, které dokáží přeměnit dopadající sluneční záření na elektrickou energii. Vzhledem ke skutečnosti, že na celý povrch Země osvětlený Sluncem dopadá zářivý výkon 180 000 TW, zatímco veškerá spotřeba všech typů energie naší civilizace je asi 10 TW, je nabídka solární energie dostatečná k nahrazení všech ostatních zdrojů energie. Problém, který v souvislosti se zmíněnými skutečnostmi vyvstává, je realizace dostatečně účinných a levných fotovoltaických systémů, jejichž základním kamenem jsou solární články.

Přestože se technologie výroby pořád zdokonaluje, průmyslově vyráběné solární články stále obsahují velké množství defektů a nehomogenit. Ty mohou vznikat jak při výrobě samotného křemíku, tak při procesu výroby solárního článku. Významnou roli zde hrají lokální defekty v PN přechodu, které mohou být způsobeny zvýšenou koncentrací donorových nebo akceptorových příměsí, příměsemi cizích prvků nebo dalšími mechanismy v lokalizovaných oblastech. Ty se pak mohou projevovat nižším průrazným napětím PN přechodu v závěrném stavu, ve kterém se mohou solární články ocitnout při částečném zastínění solárního panelu. Závěrný proud přechodem v oblasti před homogenním průrazem bývá tvořen převážně vedením proudu těmito lokálními defekty. V těchto místech je pak velká proudová hustota, což může vést k prudkému lokálnímu ohřevu a následně až k lokální difúzi nebo tepelnému průrazu. Tyto defekty pak mohou mít negativní vliv na účinnost, výkon a životnost solárního článku. Z hlediska dalšího vývoje je žádoucí tyto defekty lokalizovat a především určit jejich podstatu.

Jak vyplývá z názvu práce, bude zde popsáno studium a charakterizace sekundárně vytvořených struktur na křemíkových solárních článcích. Pojmem sekundárně vytvořené struktury rozumíme struktury vytvořené za účelem potlačení negativního vlivu lokálních defektů a hran na funkci solárního článku. Tím je myšleno především vytvoření laserových zářezů sloužících k izolaci hran. Tyto laserové zářezy jsou výrobci běžně používány, nicméně dosud neexistují publikace, které by se věnovaly vlivu těchto zářezů na funkci solárního článku. Jedním z cílů této práce je tuto mezeru vyplnit.

Dále pak sekundárně vytvořenou strukturou rozumíme úpravu defektní oblasti pomocí odprašování fokusovaným iontovým svazkem. Bude ukázána přesná lokalizace problematické defektní oblasti solárního článku a její následné odstranění. Následně pak budou prezentovány výsledky chování solárních článků před a po takové úpravě. Pro určení vlivu těchto struktur na vlastnosti a funkci krystalického

křemíkového solárního článku budou použity moderní pokročilé diagnostické metody jak elektrické (VA charakteristiky, měření rezistivity a odporu), tak i metody optické (měření lokálního vyzařování – CCD kamera, termokamera, lock-in termografie). Samozřejmostí je zde využití skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) vybaveným technologií odprašování pomocí iontového svazku (FIB). Hned v úvodu je však nutno zmínit, že technologii FIB je možno využít pouze v laboratorním prostředí, nicméně některé výsledky výzkumu v této oblasti by ve spojení s jinými technologiemi mohly být přenositelné do průmyslu.

Předložená dizertační práce je rozčleněna do sedmi kapitol. V první kapitole jsou definovány cíle práce. Následují dvě kapitoly, kde jsou shrnuty nejdůležitější teoretické základy, které tvoří pozadí této práce a také jsou zde uvedeny charakterizační techniky a technologie spojené s problematikou solárních článků. Čtvrtá kapitola pak seznamuje s použitými experimentálními metodami a stručným popisem měřících pracovišť. Zbývá část práce, kapitoly pět, šest a sedm, je věnována prezentaci dosažených experimentálních výsledků.

Prezentované výsledky práce vznikly za podpory projektů GAP102/10/2013, „*Fluktuační procesy v PN přechodech solárních článků*“, FR-TI1/305, „*Aplikace laserových technologií do procesu výroby krystalických křemíkových solárních článků*“, CEITEC (Středoevropský technologický institut, CZ.1.05/1.1.00/02.0068) a SIX (Sensor, information and communication systems, CZ.1.05/2.1.00/03.0072) řešenými na Ústavu fyziky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, na kterých jsem po dobu mého studia aktivně spolupracoval.

1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Tématem předložené dizertační práce je především charakterizace sekundárně vytvořených struktur v PN přechodech krystalických křemíkových solárních článků. Tímto jsou myšleny struktury vytvořené laserovou technikou a technologií fokusovaného svazku iontů. Jedním z cílů práce je vyplnit mezeru v literatuře, kdy doposud nebyla na toto téma žádná rozsáhlá práce publikována. Hlavní cíle dizertace lze shrnout do následujících bodů:

- Fyzikální popis PN přechodu solárního článku obsahující sekundárně vytvořené struktury a stanovení náhradních elektrických modelů.
- Vyhodnocení vlivu sekundárně vytvořených struktur na parametry solárního článku, který obsahuje lokální defekty v PN přechodu.
- Návrh komplexní metodiky pro nedestruktivní diagnostiku laserem vytvořených struktur na křemíkových solárních článcích a pro posouzení jejich vlivu na parametry a funkci solárních článků.

Splnění těchto cílů významně přispěje ke stanovení vlivu sekundárně vytvořených struktur na charakteristiky krystalických křemíkových článků a zároveň umožní definovat přístupy k jejich charakterizaci. K naplnění vytyčených cílů dizertace bude zapotřebí především splnit níže uvedené dílčí cíle:

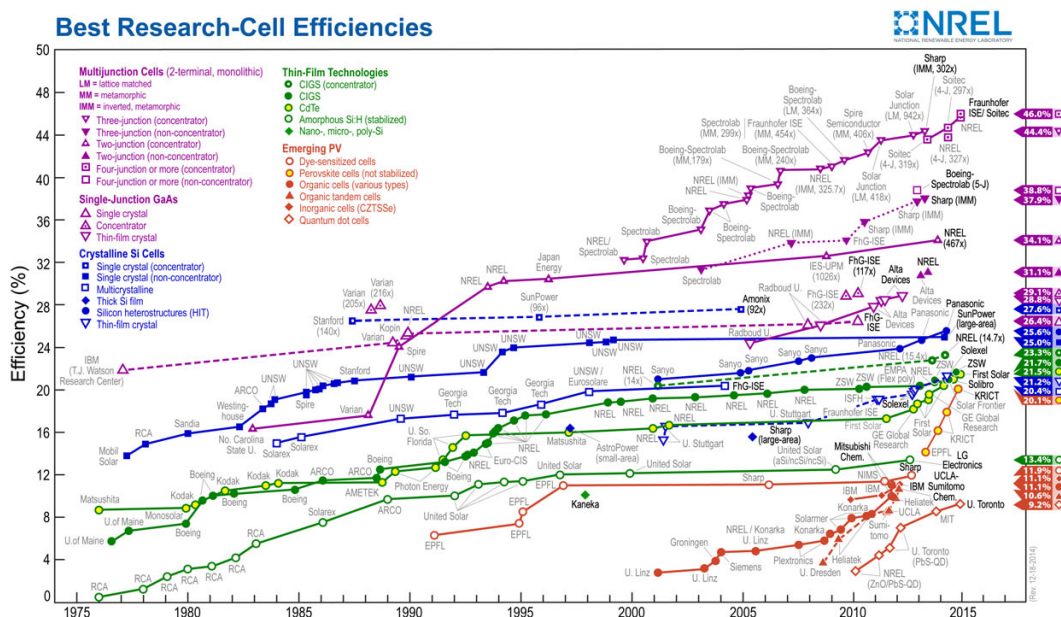
- Zpracovat přehled oborově podobných článků a publikací, zmapovat prováděné experimenty a podrobně analyzovat vlastnosti solárních článků.
- Zavést metodiku měření a měřicí standardy tak, aby bylo možné v rámci dalšího výzkumu definovaně sledovat určité parametry.
- Studium lokálních defektů křemíkových solárních článků a jejich vlivu na parametry a funkčnost solárních článků.
- Provést základní měření vzorků, zjistit jejich typické vlastnosti, které souvisí se současným stavem výrobní technologie.
- Charakterizovat vzorky použitím elektrických metod diagnostiky (VA charakteristiky, měření rezistivity).
- Charakterizovat vzorky použitím optických metod (měření lokálního vyzařování ve viditelném i infračerveném spektru – CCD kamera, termokamera, lock-in termografie, využití mikroskopie).
- Zdokonalit metodu kontaktování pro měření rezistivity povrchu křemíkového solárního článku.

- Hledat korelace mezi výsledky jednotlivých charakterizačních technik.
- Navrhnout náhradní elektrický model pro laserové zářezy a aplikovat je na naměřená data.
- Rozpracovat popis jednotlivých lokálních defektů v PN přechodu a určení jejich vlivu na charakteristiky solárního článku.
- Charakterizovat laserem vytvořené struktury pro různé parametry laseru a stanovit jejich vliv na charakteristiky solárního článku.
- Navrhnout přístup pro vyhodnocení kvality laserem vytvořených izolačních struktur na solárních článcích.
- Charakterizovat vliv sekundárně vytvořených struktur vzniklých odprašováním defektní oblasti fokusovaným iontovým svazkem (FIB).
- Charakterizovat vliv hran na charakteristiky solárních článků a to jak hran vytvořených v průběhu výrobního procesu, tak i v souvislosti se sekundárním opracováním.
- Navrhnout metodiku pro diagnostiku sekundárně vytvořených struktur v PN přechodu solárních článků (integrace dílčích výsledků z předchozích oblastí do procesu diagnostiky s ohledem na maximální efektivitu celého systému).

2 PROBLEMATIKA SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

2.1 Historie solárních článků

Počátek historie solárních článků můžeme datovat rokem 1839, kdy francouzský fyzik Edmund Becquerel objevil fotoelektrický jev. V roce 1877 objevili William G. Adams a Richard E. Day fotovoltaický efekt na selenu a byl vyroben první solární článek [25]. Důležitým krokem v historii byl objev způsobu růstu monokrystalu křemíku (rok 1916) tzv. Czochralského metoda, pojmenovaná po polském vědci (Jan Czochralski). Přestože byl fotovoltaický efekt postupně pozorován i u jiných prvků (sulfid kademnatý, oxid mědi), křemík se ukázal jako nejvýhodnější. Za vynálezce křemíkového solárního článku bývá označován Američan Russel Ohl (1941) [26]. Patent na “převaděč solární energie” dostali však 5. března 1954 D. M. Chapin, C. S. Fuller a G. L. Pearson, kteří o měsíc později předvedli křemíkové solární články s účinností 4,5 % a později 6 % [70].



Obr. 2.1: Vývoj dosažených účinností pro různé technologie solárních článků v laboratorních podmínkách [1].

Velký rozvoj fotovoltaiky nastal především díky vesmírnému programu. Účinnost článků postupně stoupala, v roce 1958 dosáhla 9 %. To už bylo postačující na to, aby první umělá družice Spojených Států (Vanguard I), vypuštěná 17. března téhož roku, mohla být takovými články napájena (výkon 0,1 W, rozměry cca 100 cm², družice pracovala 8 let). Explorer VI, vypuštěný o rok později, měl už solárních článků 9 600 (každý o rozměrech 1 × 2 cm²). V roce 1960 se účinnost článků zlepšila na

14 %. A tak první telekomunikační družice, legendární Telstar, mohla být zásobena energií pomocí zdroje o výkonu 15 W [26, 25].

Pro výrobu elektřiny v pozemských podmínkách začaly být solární články používány přibližně od druhé poloviny 80. let 20. století. Technologické postupy používané pro kosmický program se ukázaly jako nevhodné. Bylo nutné snížit náklady na výrobu, řešit problémy s absorpcí záření po průchodu atmosférou, dostatečnou účinnost při polojasném počasí a volbu materiálu pro maximální účinnost.

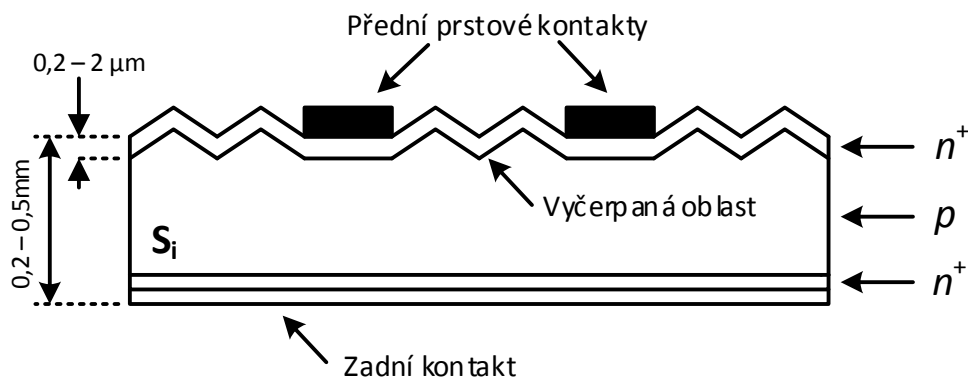
Současný stav se jeví tak, že 84 % produkce solárních článků je založeno na křemíkové tlustovrstvé technologii. Ta profituje z mnoholetých zkušeností při výrobě mikroelektronických struktur a z kompatibility se současnými výrobními linkami. Z hlediska účinnosti můžeme solární články rozdělit na tři kategorie: standardní pro masové využití s účinností v rozmezí (10–14) %, se zvýšenou účinností (14–20) % pro náročné aplikace a poslední skupinou jsou laboratorní, u kterých je stále praktická využitelnost omezena, zato dosahují účinnosti okolo 25 %, viz obr. 2.1 [48]. Pro krystalické solární články platí, že od roku 1995 se již laboratorně nedaří zvětšovat účinnost a možnosti této technologie jsou již vyčerpány. Je tedy zřejmé, že největším problémem je transfer laboratorních technologií do výrobního průmyslu [28].

2.2 Fyzikální podstata solárního článku

Pro začátek je nezbytné uvést, že solární články založené na krystalickém křemíku jsou prakticky diody s velkou plochou PN přechodu, který je vystaven slunečnímu záření a umožňuje přímou konverzi energií. Je tedy zřejmé, že popis fyzikální podstaty solárního článku můžeme transformovat na popis interakce optického záření s polovodičovým materiálem. Touto problematikou se podrobně zabývá celá řada autorů ve svých monografiích z oblasti fyziky pevných látek, například [57, 72, 63]. Následující text shrnuje pouze vybranou základní problematiku fyzikální podstaty solárního článku.

2.2.1 Struktura křemíkového solárního článku

Na obr. 2.2 je schematicky znázorněna struktura běžného křemíkového solárního článku. Při výrobě článku je nejprve po chemickém opracování (leptání, texturace, čištění) křemíkové destičky vytvořen PN přechod difuzí fosforu, a to zhruba v hloubce (0,2–0,5) μm pod povrchem. Při difuzi vzniká na povrchu vrstva fosforsilikátového skla, která musí být odstraněna a povrch je pokryt antireflexní vrstvou (SiN_x nebo TiO_2). Po depozici antireflexní vrstvy jsou realizovány kontakty sběrnice – obvykle pomocí vodivých past nanesených na povrch článků sítotiskem. Na straně s přechodem PN (na vrstvu N+) je sítotiskem nanесena sběrnice (Ag pasta) a na



Obr. 2.2: Znázornění průřezu solárním článkem.

zadní stranu je sítotiskem nanesen kontakt (Al-Ag pasta). Po vysušení pasty následuje vypálení, při kterém dojde k rozrušení antireflexní nitridové vrstvy a vytvoření ohmických kontaktů [8].

2.2.2 Základní princip

V případě, že foton dopadne na křemíkový článek, mohou nastat následující tři stavy:

- Foton může projít křemíkem – to platí obecně pro fotony s nižší energií.
- Foton může být odražen na povrchu článku.
- Foton bude křemíkem absorbován v případě, že energie fotonu je větší než šířka zakázaného pásu křemíku. To způsobí generaci páru elektron-díra a případný přebytek energie se může změnit v teplo.

Když je foton absorbován, energie je předána elektronu v krystalové mřížce. Obvykle se tento elektron nachází ve valenčním pásu a je pevně vázaný se sousedními atomy, a proto se nemůže pohybovat dále. Energie předaná fotonem elektron excituje do vodivostního pásu, kde se může volně pohybovat polovodičem. Po excitovaném elektronu v atomu křemíku zůstane volné místo, vzniká tzv. díra. Chybějící pevná vazba umožňuje elektronu sousedního atomu přesunout se do díry a zanechává za sebou novou díru, čímž se díra šíří přes celou mřížku. Můžeme říct, že absorbovaný foton v polovodiči vytváří pohyblivé páry elektron-díra. Aby byl foton schopen excitovat elektron z valenčního pásu do vodivostního, a tedy generovat pár elektron-díra, je nutné, aby měl energii větší nebo rovnou velikosti šířky zakázaného pásu E_g . Šířka zakázaného pásu křemíku je zhruba $E_g \approx 1,12 \text{ eV}$ pro $T = 300 \text{ K}$, je proto transparentní pro fotony s nižšími energiemi, kterým odpovídají vlnové délky λ přibližně

větší než 1100 nm podle známého vztahu pro energii fotonu

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2.1)$$

kde h je Planckova konstanta, f je frekvence a c je rychlost světla. Pro popis principu funkce budeme předpokládat, že dopadem výše zmíněných fotonů do oblasti PN přechodu se vlivem předávání energie atomům v krystalické mřížce uvolňují elektrony, které díky potenciální bariéře tvořené PN přechodem nemohou přecházet do kladné vrstvy s vodivostí P a hromadí se ve vrstvě s vodivostí N. Stejným způsobem se hromadí díry v oblasti s vodivostí typu P. Opticky generované elektrony a díry jsou vlivem vnitřního elektrického pole separovány, díry jsou urychleny ve směru pole, elektrony opačně. Tímto mechanismem se nahromadí nosiče náboje, čímž se vytvoří elektrický potenciál a po zapojení do obvodu může procházet elektrický proud [44].

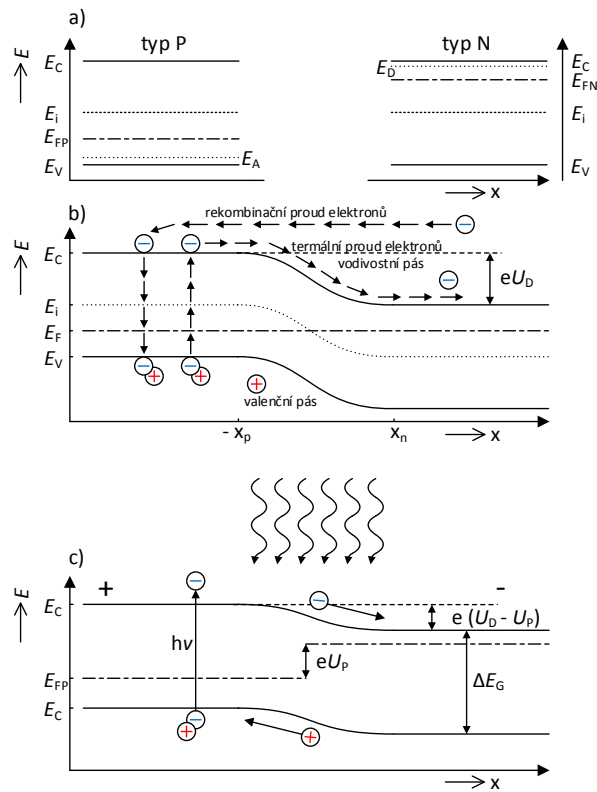
2.2.3 PN přechod solárního článku

Jak již bylo zmíněno, základem křemíkového solárního článku je PN přechod. Idealizovaný model PN přechodu pro solární článek můžeme vidět na obr. 2.3.

Jak bylo řečeno výše, část uvolněných elektronů přejde do kladné vrstvy typu P a část děr opačně. Elektrické pole, vzniklé oblastí prostorového náboje vytvořeného pevně vázanými náboji ionizovaných příměsí, zabráni dalšímu toku volných nosičů. Je zřejmé, že hladina Fermiho energie musí být v termodynamické rovnováze vyrovnána v celém krystalu, a proto dochází v místě přechodu k ohybu pasů, toto je znázorněno na obr. 2.3b. Body x_p a x_n pak určují šířku PN přechodu, U_D je difuzní napětí, tj. potenciálový rozdíl mezi různě dopovanými oblastmi. Velikost tohoto napětí je závislá na míře dotace P a N a platí pro něj následující vztah

$$U_D = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right), \quad (2.2)$$

kde N_A je koncentrace akceptorů, N_D je koncentrace donorů, k je Boltzmannova konstanta, T absolutní teplota a n_i je intrinzická koncentrace [41, 44]. Uvažujme nyní, že se naše zmíněná struktura nachází v termodynamické rovnováze, tj. že v celém objemu polovodiče dochází pouze k termální generaci a rekombinaci elektronů a děr ($T > 0$ K). Na obr. 2.3b můžeme vidět, že přes PN přechod tečou oběma směry elektrické proudy (na obrázku jsou znázorněny pouze proudy elektronů). V případě, že některé elektrony v polovodiči typu N budou mít vyšší energii než je velikost potenciálové bariéry dané difuzním napětím U_D , pak mohou přecházet přes PN přechod do polovodiče typu P, kde dochází k rekombinaci s volnými dírami. Takový proud pak nazýváme driftový. Zároveň se v polovodiči typu P generují páry volných elektronů a děr. Elektrické pole PN přechodu pak tyto volné elektrony urychluje



Obr. 2.3: Model PN přechodu solárního článku. a) Schéma energetických hladin v polovodiči typu P a N. b) Vyrovnání Fermiho energie a ohyb pásů v místě PN přechodu. c) Osvětlený PN přechod, který není zapojen v elektrickém obvodu.

směrem do polovodiče typu N a vzniká difuzní neboli termální proud [41]. Driftový a difuzní proud jsou bez přiložení vnějšího napětí vyrovnané, a tak se struktura jeví jako neutrální.

Obr. 2.3c je znázorňuje situaci, kdy na solární článek začne dopadat světlo. Dopadajícími fotony jsou generovány elektrony a díry. Vnitřní elektrické pole pak urychluje díry ve směru elektrického pole a elektrony opačně. Tímto procesem ve vrstvě N vzniká přebytek elektronů a ve vrstvě P přebytek děr, mezi póly solárního článku vzniká napětí a při připojení do obvodu může téct proud [10, 41].

2.2.4 Elektrická charakteristika ideálního solárního článku

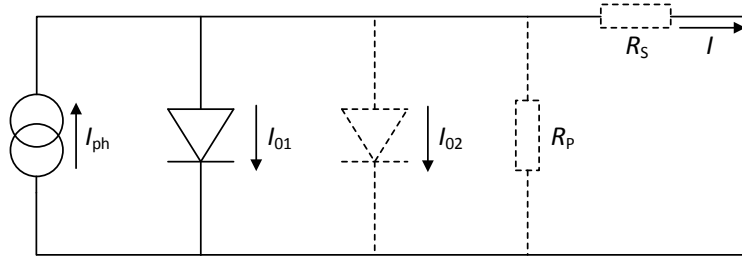
Ideální solární článek může být reprezentován jako proudový zdroj zapojený paralelně s usměrňovací diodou, jak je ukázáno na obr. 2.4. Odpovídající VA charakteristiku lze v temném prostředí vyjádřit Shockleyho rovnicí

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU_{VN}}{nkT}} - 1 \right), \quad (2.3)$$

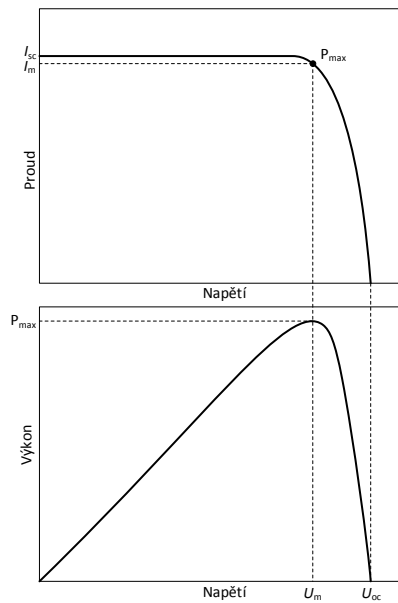
kde k je Boltzmannova konstanta, T je absolutní teplota, e je elementární náboj elektronu, U_{VN} je vnější připojené napětí a I_0 je saturační proud. V případě, že na solární článek bude dopadat světlo, můžeme rovnici přepsat do tvaru

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{eU_{VN}}{nkT}} - 1 \right), \quad (2.4)$$

kde I_{ph} je proud generovaný článkem při osvětlení [47]. Na obr. 2.5 je zobrazena ideální VA charakteristika solárního článku.



Obr. 2.4: Náhradní obvod ideálního solárního článku (plné čáry), součástky reprezentující parametry reálného článku jsou zobrazeny přerušovanou čarou.



Obr. 2.5: VA charakteristika ideálního solárního článku a výkon generovaný článkem.

V ideálním případě je proud nakrátko roven I_{ph} a napětí naprázdno U_{oc} , tzn. napětí při nulovém proudu, můžeme vyjádřit následujícím vztahem

$$U_{oc} = \frac{nkT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right). \quad (2.5)$$

Výše uvedená rovnice ukazuje, že U_{oc} závisí na saturačním proudu I_0 a proudu generovaném článkem I_{ph} . Zatímco I_{ph} má obvykle malou variabilitu, klíčovým je saturační proud I_0 , který se může lišit v řádech. I_0 závisí na koncentraci příměsí a ploše přechodu PN. Zároveň tento vztah ukazuje na souvislost U_{oc} s faktorem kvality diody n . Je zřejmé, že vzrůst tohoto faktoru nad hodnotu $n = 1$ by měl vést ke zvýšení U_{oc} . Nicméně změna mechanismu přenosu náboje například z difúzního ($n = 1$) na rekombinační ($n = 2$) by však znamenala pokles proudu I_{ph} vzhledem k rekombinaci nadbytečných nosičů v oblasti prostorového náboje [68]. Vysoce kvalitní monokrystalické křemíkové solární články mají hodnotu U_{oc} až do 730 mV při osvětlení definovaným referenčním spektrem AM1.5, zatímco běžné komerční polykrytalické články mají hodnotu U_{oc} typicky okolo 600 mV [34]. Napětí U_{oc} můžeme také určit z koncentrace nosičů náboje [58]

$$U_{oc} = \frac{nkT}{e} \ln \left[\frac{(N_A + \Delta n) \Delta n}{n_i^2} \right], \quad (2.6)$$

kde N_A je koncentrace akceptorů, Δn je koncentrace nadbytečných nosičů a n_i je intrinzičká koncentrace. Výkon produkovaný solárním článkem $P = UI$ je zobrazen na obr. 2.5. Článek generuje maximální výkon P_{max} při napětí U_m a proudu I_m a můžeme ho využít pro definování fill faktoru FF

$$FF = \frac{I_m U_m}{I_{sc} U_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} U_{oc}}. \quad (2.7)$$

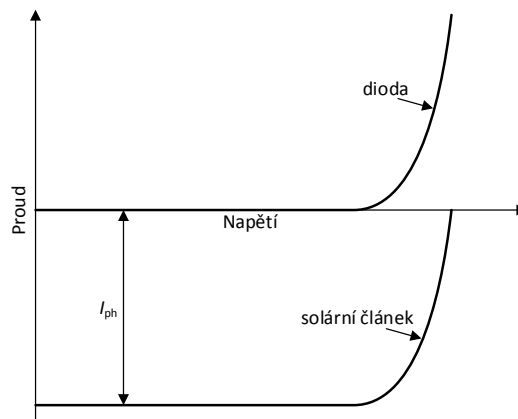
Fill faktor FF solárního článku s ideální charakteristikou se značí FF_0 . Nelze ho stanovit analyticky, ale podle literatury [27] můžeme ukázat, že FF_0 závisí pouze na poměru $u_{oc} = U_{oc} / kT$ a je pak určen s velkou přesností přibližným vztahem

$$FF_0 = \frac{u_{oc} - \ln(u_{oc} + 0,72)}{u_{oc} + 1}. \quad (2.8)$$

Na závěr této kapitoly je ještě nutno zmínit, že VA charakteristika ideálního solárního článku vychází z principu superpozice, jinými slovy křivka z obr. 2.5 odpovídá VA charakteristice diody ve tmě, která je posunuta podél proudové osy proudem I_{ph} viz obr. 2.6.

2.2.5 Elektrická charakteristika solárního článku v praxi

VA charakteristika solárního článku v praxi se samozřejmě obvykle liší od ideální charakteristiky na obr. 2.5. Pro fitování naměřených charakteristik se nejčastěji používá náhradní model se dvěma diodami, viz obr. 2.4 (model včetně čerchovaných čar) [73]. Oproti modelu ideálního solárního článku je přidána paralelně druhá dioda, která reprezentuje vliv rekombinace nosičů. V modelu je zahrnut i sériový (R_s)



Obr. 2.6: VA charakteristika PN přechodu v temném prostředí a při osvětlení.

a paralelní odpor (R_P). Rovnice popisující proud takovým obvodem pak bude následující

$$I = I_{ph} - I_{01}e^{\frac{U+IR_S}{kT}} - I_{02}\left(e^{\frac{U+IR_S}{2kT}} - 1\right) - \frac{U + IR_S}{R_P}. \quad (2.9)$$

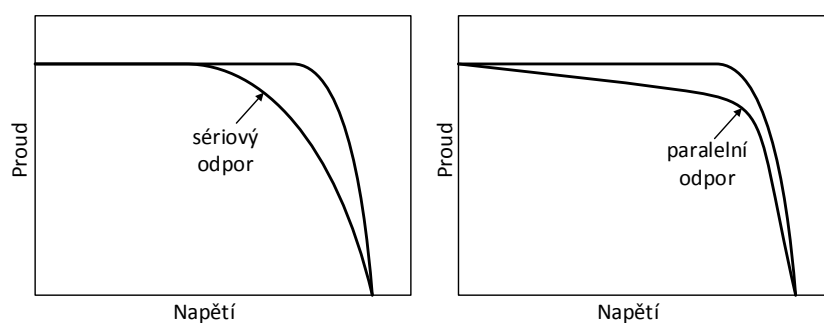
Jakým způsobem se nám projeví vliv sériového a paralelního odporu na sklon VA charakteristiky pak můžeme pozorovat na obr. 2.7. Z charakteristik je zřejmé, že paralelní a sériový odpor budou mít významný vliv na výkon a tím i fill faktor solárního článku a tím ovlivní i nejdůležitější parametr solárního článku, tj. jeho konverzní účinnost η , kterou můžeme definovat následujícím vztahem

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{FFU_{oc}I_{sc}}{P_{\text{in}}}, \quad (2.10)$$

kde P_{in} je dopadající výkon, který je dán především vlastnostmi dopadajícího světelného spektra na solární článek [46].

Je zřejmé, že na výslednou konverzní účinnost solárního článku má vliv celá řada faktorů. V první řadě vznikají ztráty při dopadu záření na solární článek, tj. vznikají ztráty energie reflexí a stínícím účinkem kontaktů. Dalším faktorem je šířka zakázaného pásu, zde jsou ztráty spojené s neschopností fotonů s nižšími energiemi generovat páry nosičů a pak ztráty způsobené přeměnou přebytečné energie některých fotonů v teplo. Neméně důležitým faktorem pak jsou rekombinační ztráty, tzv. sběrná účinnost. Tato účinnost vyjadřuje, jaká část nosičů generovaných zářením o vlnové délce λ se skutečně podílí na tvorbě fotoproudu. K dalším ztrátám pak dochází díky tzv. napětovému faktoru, pro který platí následující vztah

$$\eta_U = \frac{eU_{oc}}{E_g}, \quad (2.11)$$



Obr. 2.7: Vliv sériového (vlevo) a paralelního (vpravo) odporu na VA charakteristiku solárního článku.

který vyjadřuje skutečnost, že napětí naprázdno nedosahuje limitní teoretické hodnoty E_g [68, 31, 65]. Procentuální zastoupení jednotlivých ztrátových mechanismů pro křemíkové solární články jsou přibližně shrnuty v tab. 2.1 podle literatury [42].

Tab. 2.1: Procentuální zastoupení jednotlivých ztrátových mechanismů z celkových ztrát v křemíkových solárních člancích v běžných podmínkách.

Ztrátový mechanismus	Ztráty
přeměna přebytečné energie fotonů v teplo	34 %
fotony s nízkou energií (neabsorbovány)	23 %
napěťový faktor	17,60 %
fill faktor	4,80 %
rekombinační ztráty	3,70 %
ostatní ztráty	2,90 %

2.3 Typy defektů křemíkových solárních článků

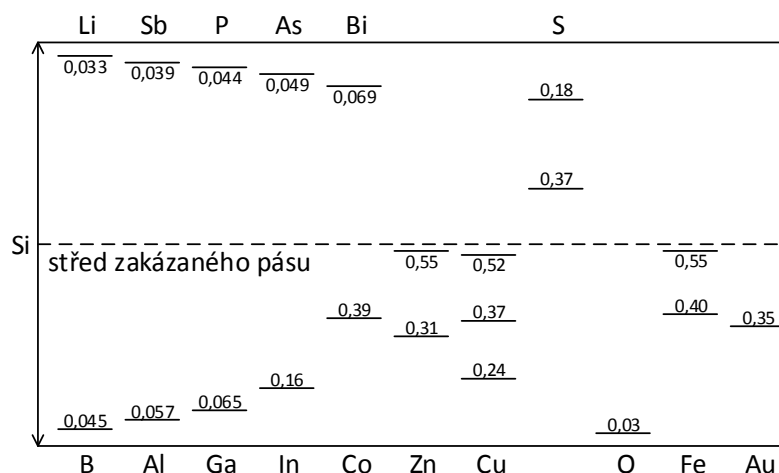
Současný stav je takový, že křemík pro fotovoltaické účely obvykle obsahuje celou řadu různých defektů. Podle typu poruch pak můžeme mluvit o bodových poruchách (vakance, intersticiální částice nebo příměsi), čárových poruchách (dislokační čáry), plošných a objemových poruchách. Je zřejmé, že defekty na křemíkových solárních článcích vznikají jak při výrobě křemíkových ingotů a při následném technologickém procesu výroby článků, tak i následně během provozu. Při výrobě křemíku se jedná především o nečistoty v křemíku, které pak negativně ovlivňují účinnost solárního článku. Při následném technologickém procesu pak mohou vznikat různé defekty poškrábáním, nekvalitním opracováním hran nebo vznik nehomogenit při procesu difúze [25, 33]. Existuje celá řada publikací, které se zabývají defekty na solárních článcích, kde jsou tvořeny různé katalogy defektů [60, 64, 18, 14]. Z důvodu rozmanitosti jsem zvolil základní dělení defektů podle původu vzniku na následující dvě skupiny:

- Materiálové defekty
- Procesní defekty

Je zřejmé, že každá z těchto skupin obsahuje velkou škálu typů jednotlivých defektů, proto v následujícím textu budou zmíněny pouze vybrané z nich.

Materiálové defekty

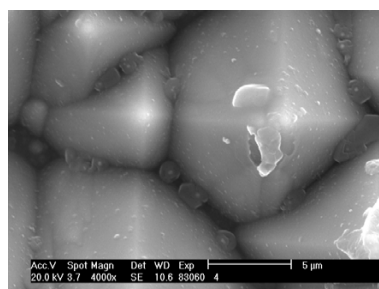
Materiálovými defekty se rozumí takové, které vznikají během výroby samotného křemíku. Pro výrobu křemíku se běžně používá Czochralského metoda. Vzhledem k tomu, že pro potřeby fotovoltaiky se volí mnohem větší rychlosti tažení, obsahuje křemík větší množství defektů a materiálových nečistot. Typicky tyto substráty obsahují uhlík nebo kyslík v téměř nasycených úrovních, přechodné kovy v rozmezí koncentrací (10^{12} – 10^{14}) cm^{-3} a řadu dalších nechtěných příměsí, jako jsou Ti a Va [3]. Například příměs kyslíku způsobuje jeden z nejznámějších materiálových defektů, tzv. vírový defekt [13, 30]. Tyto příměsi pak vytvářejí parazitní energetické hladiny v zakázaném pásu, které pak mohou zachytávat volné nosiče náboje. Takový nosič pak může odevzdat svou energii formou tepla, čímž klesá účinnost solárního článku [6]. Tento proces se nazývá SRH (Shockley-Read-Hall) rekombinace. Reálně bývá takových příměsí v křemíku několik typů a tím se vytvoří i několik hladin v zakázaném pásu [43, 21, 25]. Parazitní energiové hladiny vybraných příměsí jsou znázorněny na obr. 2.8, hodnoty vyznačené u jednotlivých hladin jsou uvedeny v elektronvoltech odpovídajícím vzdálenosti od valenčního (hladiny pod středem pásu) respektive vodivostního pásu (hladiny nad středem pásu).



Obr. 2.8: Parazitní energiové hladiny vytvořené různými příměsi v zakázaném pásu křemíku.

Procesní defekty

Mezi procesní defekty můžeme zařadit veškeré mechanické poškození a defekty vzniklé během technologického procesu výroby samotného solárního článku. To je například přímo poškrábání solárního článku při manipulaci během výroby, nekvalitně opracované hrany, okrajové odštípnutí, nehomogenita difúzní vrstvy a další. Nejčastěji se objevuje mechanické poškození ve formě odštípnutí pyramidové struktury povrchu solárního článku, tedy dojde k lokálnímu odstranění PN přechodu. Dále sem můžeme zařadit nehomogenitu difúzní vrstvy, tím rozumíme vnik nečistot do plynného fosforu při dotování křemíku. Mezi další procesní poškození se řadí i nedokonalé provedení metalizace. Příklad mechanického defektu je ukázán na obr. 2.9, kde lze pozorovat odštípnutou hranu solárního článku.



Obr. 2.9: Ukázka procesního defektu solárního článku – odštípnutý vrchol pyramidové struktury solárního článku.

3 TECHNOLOGIE SPOJENÉ S VÝZKUMEM SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

3.1 Diagnostické metody

Teoretické a experimentální studium projevů lokálních defektů v PN přechodu křemíkových solárních článků se v současnosti provádí pomocí jak elektrických metod (VA charakteristiky, šumové charakteristiky), tak i metod optických (měření lokálního vyzařování – CCD kamera, termokamera, lock-in thermography, měření elektrické odezvy při lokálním ozařování – LBIC, NOBIC, topologie povrchu, lokální odrazivost) a hledají se případné korelace mezi jednotlivými metodami. V této kapitole jsou metody popsány pouze informativně, podrobnější popis jednotlivých metod bude uveden v experimentální části.

3.1.1 Elektrické metody

Šumová diagnostika vychází z předpokladu, že defekty ve struktuře solárního článku způsobují vznik nadbytečných šumů. Existenci defektních oblastí lze pak určit měřením fluktuací vybraných elektrických veličin. Šumové příspěvky jednotlivých defektů můžeme pak pozorovat jako nadbytečný šum buď v časové, nebo ve frekvenční oblasti [36, 53]. Využívá se zde skutečnosti, že aktivita defektů je často silně napětově závislá. Díky tomu lze při měření součástky jako celku, i v případě, že obsahuje větší počet defektů, odlišit příspěvky jednotlivých zdrojů šumu. K tomuto účelu je velmi užitečnou metodou měření napětové závislosti efektivní hodnoty úzkopásmového šumového proudu ve vhodném frekvenčním pásmu [38, 37].

Další metodou, kterou lze získat spoustu užitečných informací o měřených vzorcích, je měření VA charakteristik. Některé funkční projevy defektů jsou pozorovatelné až při dosažení určitých napětí. Často zde pak dochází k nedestruktivním lokálním průrazům, které jsou doprovázeny nárůstem proudu. Pomocí VA charakteristik lze zkoumat vznikající kanály a jejich vodivost. Využitím měření teplotních závislostí VA charakteristik je možné v případě lokálních průrazů určit jejich mechanismus a dále i získat užitečné informace o struktuře a parametrech vlastního článku [66].

3.1.2 Optické metody

Jednou z velmi rozšířených optických metod diagnostiky je technika měření světlem lokálně indukovaného proudu LBIC (Light Beam Induced Current), která slouží ke zmapování prostorového rozložení fotoproudu solárním článkem [17]. To umožňuje

identifikovat lokální oblasti projevující se sníženou účinností přeměny energie dopadajícího záření na elektrickou energii. Je zde možnost i regulovat hloubku vniku záření pomocí změny vlnové délky použitého záření. Dalším přístupem je spojení mikroskopie v blízkém poli s diagnostickou metodou LBIC, tj. NOBIC (Near-field Optical Beam Induced Current). Tato metoda umožňuje nalézt v mikroskopickém měřítku defektní oblasti s horší přeměnou dopadajícího záření na elektrickou energii. Prostorové rozlišení této metody je pod vlnovou délkou použitého světla. Opakovaně lze dosáhnout rozlišení 100 nm [32].

Další doplňkovou optickou metodou je analýza vyzařování z PN přechodů solárních článků. Často jsou pozorovány velmi zajímavé korelace s elektrickými metodami a výhodou je snadná lokalizace nehomogenit v rámci plochy vzorku. Pro měření vyzařování ve viditelném spektru z plošného PN přechodu u solárních článků se používají CCD kamery [23], respektive v infračerveném spektru termokamery. V současnosti se pro zvýšení citlivosti snímání infračerveného záření používá technologie lock-in termografie [12]. Základní princip lock-in termografie je založen na periodickém ohřevu povrchu pozorovaného objektu a analýzou lokálních teplot na povrchu objektu [11].

3.2 Laserové procesy a jejich využití na křemíkových solárních článcích

Laserové technologie hrají významnou roli při zpracování množství materiálů používaných ve strojírenství a obecně ve výrobě. Rozmezí procesů, kterých se účastní laserová technologie se stále zvyšuje. Jednou z oblastí ve které našli lasery své uplatnění je i fotovoltaika. Zde se uplatňují ve více oblastech, například Laser-Fired Contacts (LFC), Laser-Grooved Buried Contact (LGBC) nebo Metal/Emitter Wrap-Through (M/EWT). Dalším velmi rozšířeným využitím laseru je v poslední době izolace hran pomocí laseru. Potřeba izolace hran vychází z nedokonalosti opracování hran při výrobě křemíkových solárních článků. Laserová izolace hrany je obvykle dosažena vypálením drážky kolem celého obvodu solárního článku, co nejbližě okraji, jak jen je to možné. Hloubka zářezu musí dosahovat určitou hloubku vzhledem k difúzní vrstvě aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku. Typicky se používají zářezy o rozměrech (20–40) μm široké a (10–20) μm hluboké [2]. Nicméně technologie je stále nová a výrobci optimální parametry zářezu a použitých laserů stále hledají. Například se také studuje vliv zařazení kroku laserového opracování ve výrobním procesu, konkrétně zda toto opracování provádět ještě před povrchovou úpravou solárního článku, nebo naopak laserové zářezy vytvořit až na závěr výrobního procesu [4]. Velkým problémem může být také tavenina materiálu vzniklá při opracování laserem, v souvislosti

s tím se zkouší například použití techniky Waterjet-Guided laseru [39].

Vzhledem k tomu, že jedním z hlavních cílů této práce je návrh komplexní metodiky pro nedestruktivní diagnostiku laserem vytvořených struktur na křemíkových solárních článcích a pro posouzení jejich vlivu na parametry a funkci solárních článků, je nezbytné za účelem posouzení novosti metodiky uvést rozbor literatury zabývající se laserovými procesy na solárních článcích. Celkově lze napsat, že literatury zabývající se touto problematikou není mnoho. K posuzování vlivu laserového svazku uvedme např. [16], kde je mikroskopicky sledován vliv laserového svazku na polykrystalický křemík a vznik defektů. Dále je zde sledován přetvořený amorfní polovodič v oblasti laserového opracování. V literatuře [67] lze najít přímo vliv laserového svazku na účinnost solárního článku ve formě povrchové reflexe. Naopak autoři článku [7] sledují povrchové rekombinace a napětí na prázdný solární článek v případě, že je laserem povrch modifikován. Závěrem je nevyhnutelné snížení účinnosti ovšem ovlivnitelné parametry laserového svazku. V [19] je sledován zcela jiný záměr, a to vytváření izolovaných děr pro zanořené kontakty, případně vodivých spojů mezi horní a spodní stranou solárního článku. Opět je sledována izolace a relativně komplexní dopad všech procesů na solární článek jako celek. V článku [40] autoři také navrhuji postup, jak hodnotit laserem vytvořené rýhy. Pracují s tenkovrstvými solárními články, postupně odstraňují funkční vrstvy a hodnotí vliv svodového proudu. Neposuzují izolaci jednotlivých rýh a nutno podotknout, že používané postupy patří spíše do laboratorního prostředí. V [29] je popisována laserová izolace hran. Autoři se zabývají její kvalitou. Konstatují, že poškození je zásadní a navrhuji další chemické leptání případně laserový proces. Pro hodnocení poškození ovšem používají pouze metody fotoluminiscence bez exaktního výstupu a měření účinnosti při osvětlení. V publikaci [5] autoři studují přetvoření materiálu v důsledku tepelných pochodů při laserovém opracování. Konstatují prostorově rozsáhlé působení a poukazují na nezbytnost precizního nastavení laserového nástroje pro konkrétní strukturu a materiál. V [15] je zajímavě rozebírána široká perspektivnost laserových postupů v technice solárních článků. Jsou zde připomenuty i problémy s diagnostikou, které značně limitují aplikovatelnost v průmyslu a je zdůrazněna aktuálnost problematiky.

3.3 Elektronová mikroskopie a technologie FIB

Mikroskopy s technologií FIB získaly široké využití v základním materiálovém výzkumu a technologických aplikacích především pro jejich vysoké rozlišení a schopnosti flexibilního mikroobrábění v jediné platformě. Technologie FIB je velice podobná principu skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) s tím rozdílem, že je

zde použit iontový svazek namísto elektronového. Sekundární elektrony jsou generovány interakcí iontového svazku s povrchem vzorku a jsou využity pro získání obrazu s vysokým prostorovým rozlišením. Ve většině komerčně dostupných systémech jsou pro odprašování používány ionty galia a ve spojení s možností plynové injekce, které umožní naprašování a leptání, mají tyto systémy širokou škálu využití.

3.3.1 Vývoj technologie FIB

První systém FIB byl uveden v roce 1975. Tento systém ještě nevyužíval jako zdroj iontů LMIS (Liquid Metal Ion Source), který známe nyní, ale byl založen na technologii polní emise. První systém FIB využívající LMIS byl sestaven v roce 1978 [20, 51].

Za posledních 25 let se stala technologie FIB důležitým nástrojem pro širokou škálu materiálových věd, od úpravy obvodů a vzorků pro transmisní elektronovou mikroskopii až po úpravu prototypů nanoobrábění. Většina moderních přístrojů je vybavena technologií FIB ve spojení s technologií SEM, což umožňuje zobrazení odprašeného nebo nanášeného materiálu v jednotkách nanometrů až desítek mikronů [50, 59]. První přístroje s FIB se vyvinuly z pokroku v oblasti FIM (Field Ion Microscope) a rozvoje zdrojů iontů tekutých kovů (LMIS). V osmdesátých letech byly přístroje s FIB využívány v polovodičovém průmyslu zařízení pro tvorbu mask nebo opravu obvodů. Od začátku devadesátých let se FIB rozšířil do výzkumných laboratoří a dnes jsou komerční zařízení dostupné od mnoha výrobců. V současné době se stala technologie FIB všestranným a důležitým nástrojem pro materiálový výzkum [49, 69].

3.3.2 Základní parametry systému FIB

Základní funkce FIB, jmenovitě zobrazování a odprašování pomocí svazku iontů, vyžadují vysoce fokusovaný svazek. Ve většině komerčních systémů se jako zdroj iontů používá LMIS. Z existujících typů zdrojů paprsku iontů LMIS poskytuje nejčistější a nejlépe fokusovaný svazek. Existuje celá řada odlišných druhů LMIS, nejvíce používaným typem je jehlový zdroj produkující svazek iontů galia. Největší výhody galia oproti jiným kovům použitelným pro LMIS (In, Bi, Sn a Au) jsou nízká teplota tání (30 °C), nízká těkavost a velmi slabé odpařování do okolí [69, 54]. Nízká teplota tání umožňuje jednodušší návrh zdroje a jeho provoz. Dalším pozitivním faktorem je, že LMIS založené na galiu jsou mnohem stabilnější než jiné LMIS zdroje. Je to díky tomu, že galium nereaguje s materiálem ze kterého je vytvořena jehla (typicky wolfram) a dalším faktorem je, že odpařování galia je zanedbatelné. Velký

negativní potenciál mezi jehlou a extrakční elektrodou vytváří elektrické pole velikosti 10^{10} V / m na špičce jehly. Pole ionizuje galium a tlačí tekutý kov směrem k jemné špičce (s koncovým poloměrem hrotu asi $10\text{ }\mu\text{m}$), která se nazývá Taylorův kužel. Ionty jsou v důsledku působení pole na této špičce emitovány ze špičky a jsou urychlovány směrem dolů tubusem. V současných přístrojích je běžně používáno k urychlování iontů napětí přibližně 30 keV, ale může být dosahovat až 50 keV.

Typicky má iontový tubus soustavu dvou čoček, první jsou kondenzorové, které definují svazek iontů a druhé jsou čočky objektivové, které fokusují svazek iontů na povrch vzorku. Dále tubus obsahuje soustavu apertur různých průměrů, které umožňují nastavení různých iontových proudů a průměrů paprsku, deflektory k rastrování paprsku nad povrchem vzorku a také se zde nachází vysokorychlostní beam blanker (závěrka), jenž umožňuje rychlé odstínění svazku z exponované oblasti [55].

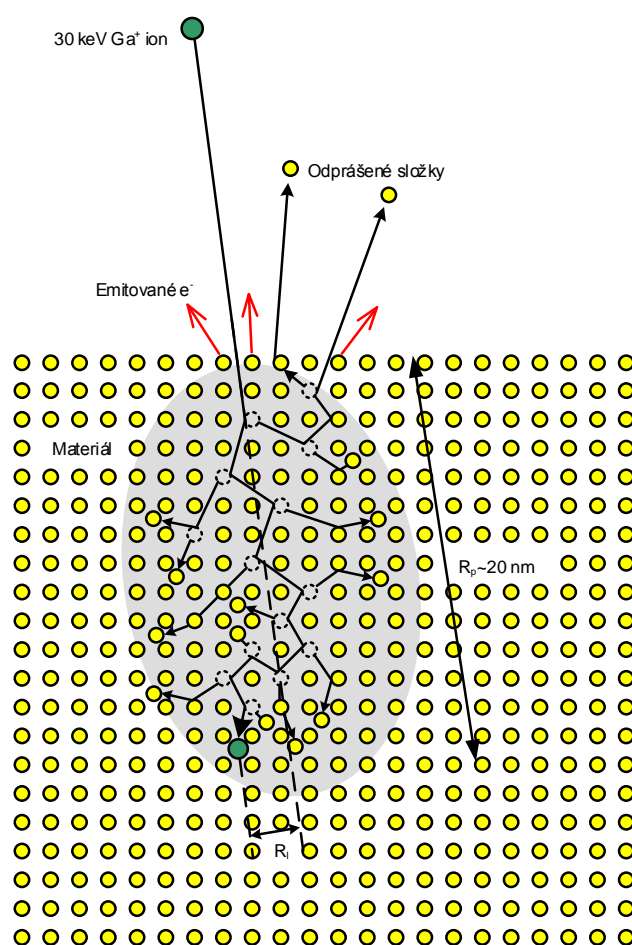
Základní využití systému FIB můžeme rozdělit na odprašování, depozici a zobrazování. Všechny jsou závislé na reakci při dopadu paprsku na povrch vzorku. Všechny schopnosti (zobrazování, depozice, odprašování) jsou silně závislé na povaze paprsku iontů a interakci s materiálem. Když iont dopadne na materiál, ztrácí kinetickou energii díky interakci s atomy vzorku. Toto předání energie z iontu do materiálu vede k několika odlišným procesům:

- odražení iontu a zpětnému rozptýlení,
- emisi elektronů,
- elektromagnetickému záření,
- rozprašování atomů a emisi iontů,
- poškození vzorku,
- zahřívání vzorku.

Typicky je iont galia urychlen a při dopadu na vzorek je implantován do jeho povrchu. To způsobí emisi sekundárních elektronů, sekundárních iontů a atomů (neutrálních). Atomy jsou uvnitř materiálu posunuty a způsobují poškození atomové mřížky a vznik fononů, které jsou rozptýleny ve formě tepla. Tento proces způsobuje odprašování materiálu ze vzorku ve formě kladných a záporných iontů [9].

3.3.3 Interakce iontu s povrchem materiálu

Kinetická energie iontů a jejich hybnost jsou přeneseny do pevné látky díky pružným i nepružným interakcím. Při nepružné interakci je energie iontu předána elektronům ve vzorku a výsledkem je ionizace a emise elektronů a elektromagnetického záření ze vzorku. V pružné interakci je energie iontů přenášena do cílových atomů. Povrchové atomy mohou být vyraženy jako odprášený materiál, pokud obdrží dostatečnou energii pro překonání povrchové vazebné energie cílového materiálu. Část vyražených atomů může být ionizována a využita pro zobrazování nebo pro analýzu materiálu [24].

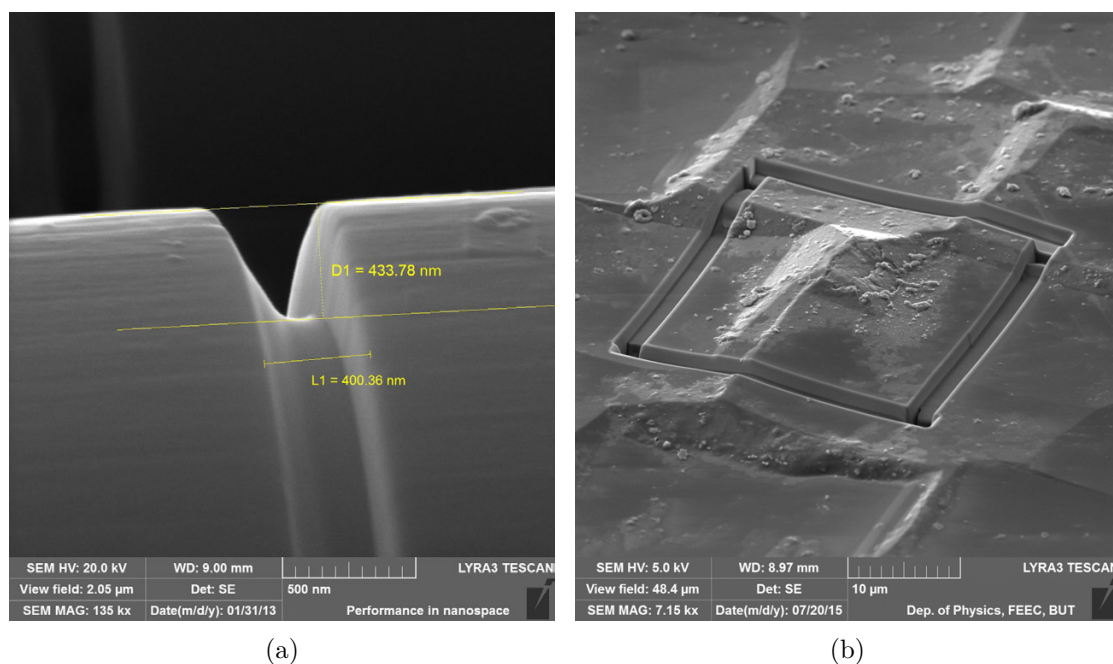


Obr. 3.1: Schématický diagram procesu odprašování a interakce iontu s materiálem.

Nejrozšířenějším konceptem pro interakci iontu s materiálem je model Collision cascade viz obr. 3.1. V případě dopadajících iontů galia urychlených napětím v rozmezí 5 – 30 keV na většinu pevných látek, tento model předpokládá sérii nezávislých

binárních kolizí. V případě, že přenesená translační energie na zasažený atom překročí určitou kritickou hranici, atom je vyražen z krystalové mřížky a vytváří vakanci a intersticiální defekt v krystalickém vzorku. Tento primárně vyražený atom může mít dostatek energie pro vyražení dalších atomů ve vzorku, což vede k vytvoření oblasti, kde má velké množství atomů přebytek kinetické energie. Dojde-li ke kolizi poblíž povrchu, vyražený atom může být emitován ven z materiálu, což vede k odprašování. Celá interakce iontu s materiálem podle modelu Collision cascade trvá přibližně 10^{-11} sekundy, po této době se iont galia zastaví v materiálu a energie všech částic klesne pod výstupní práci. Po celé kaskádě kolizí zůstanou emitované částice a záření, defekty krystalové mřížky, vniknuté ionty galia a teplo. Vzhledem k malým rozměrům a časovému měřítku celé události se pro modelování využívá molekulární dynamiky a metody Monte Carlo.

Díky schopnosti svazku iontů odprašovat materiál může být FIB používán pro lokální odstranění nebo odřezání materiálu. Příklad takového využití je na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Příklad použití technologie FIB: řezání uhlíkových vláken (a), izolace lokálního defektu na křemíkovém solárním článku (b).

Maximální rozlišení při odprašování materiálu pomocí technologie FIB je typicky okolo 10 nm [52]. Kvantitativní aspekty odprašování jsou složité a závisí na materiálu, orientaci krystalové mřížky a úhlu dopadu svazku iontů. Jak se zvyšuje úhel dopadu iontového paprsku, zvětšuje se průsečík oblasti Collision cascade s povrchem materiálu a tím se zvýší počet odprašených atomů. Nicméně se zároveň zvyšuje

i podíl odražených nebo zpětně odprášených iontů galia. Kompromisem mezi těmito aspekty pro maximální účinnost odprašování je úhel dopadu přibližně $75 - 80^\circ$. Tento fakt byl potvrzen při použití iontového svazku galia ($25 - 30 \text{ keV}$) na různých materiálech (monokrystal Si, amorfni SiO_2 , polykrystalické Au a W) a vykazuje dobrou shodu mezi experimentem a teorií [22, 71].

Hlavní nevýhodou zobrazování a opracování pomocí FIB je poškození povrchu způsobované svazkem iontů. Se zvyšujícím se počtem dávek iontů se jednotlivé nepravidelné oblasti Collision cascade překrývají a vytváří se poškozená povrchová vrstva [56]. V závislosti zejména na materiálu a teplotě vzorku může mít poškození svazkem iontů podobu: amorfizace povrchu vzorku, tvorba bodových defektů, tvorba dislokací, modifikace krystalu a jiné neobvyklé efekty. Amorfizace iontovým paprskem je dobře známý jev a byl rozsáhle studován u materiálů s kovalentní vazbou jako jsou křemík, germanium, arsenid galitý a uhlík. Naproti tomu čisté kovy mají nesměrové vazby a neamorfizují. O vzniku bodových defektů a dislokací při použití technologie FIB nebyly publikovány žádné systematické studie, nicméně existuje celá řada samostatných studií. Například se ukazuje, že měď je velice náchylná na vznik těchto defektů při použití FIB [35, 45].

4 POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ METODY

4.1 Měření VA charakteristik mezi kontakty solárního článku

Pro posuzování laserem vytvořených struktur, konkrétně pro stanovení jejich schopnosti izolovat, byla realizována měření odporu, respektive VA charakteristik, mezi jednotlivými kontakty solárního článku. Stěžejními součásti měřicí aparatury pro tato měření byly kontaktovací stanice Cascade MT150 a analyzátor polovodičových součástek Keithley 4200 SCS. Spojení těchto dvou přístrojů umožňuje získání velmi precizních výsledků.

4.1.1 Kontaktovací stanice Cascade MT150

Samotná stanice je umístěna do opticky a elektricky těsné komory. Základem stanice je kontaktovací stůl, který obsahuje vakuové přisávání vzorku a je vybaven stabilizací teploty. Přesná stabilizace teploty se v průběhu měření ukázala jako naprosto nezbytná, jednak pro potlačení vlivu okolní teploty, ale také pro eliminaci vlastního ohřevu vzorku měřicím proudem. Ztrátový výkon u velkých vzorků s defekty se pohybuje v řádu jednotek wattů a charakteristiky jsou bez teplotní regulace deformovány. Teplotní stabilizaci zajišťuje okruh s Peltierovým článkem. Teplo je



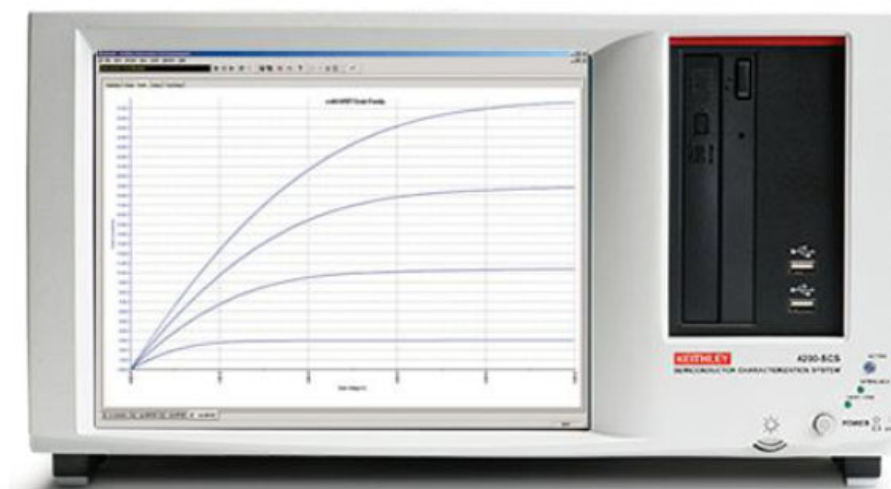
Obr. 4.1: Kontaktovací stanice Cascade MT150.

definovaně odváděno prouděním vzduchu a neovlivňuje prostor experimentu. Zvolená měřicí teplota byla 25 °C. Příkon Peltierova modulu je výrobcem definován až na 86 W a schopnost chlazení je závislá na rozdílu okolních teplot. V každém případě je k dispozici dostatečná výkonová rezerva. Jednotka s Peltierovým modulem je doplněna o elektronický termostat, který je schopen korigovat stanovenou teplotu s přesností lepší než $\pm 0,1$ °C.

Další součástí stanice jsou čtyři precizní pozicionéry DPP-210 s rozlišením posuvu 2 μm . Rozsah posuvu je ve všech osách 12,5 mm. Pro kontaktování jsou použity hroty s tloušťkou hrotu 12 μm nebo 25 μm . Sondy jsou k analyzátoru připojeny pomocí triaxiálních kabelů. Stanici doplňuje mikroskop od firmy Leica, který umožňuje přesnější kontaktování.

4.1.2 Analyzátor polovodičových součástek Keithley 4200-SCS

Model 4200-SCS Semiconductor Characterization System umožňuje měřit statické DC a pulsní charakteristiky, real-time zobrazování grafů a analýzy s vysokou přesností a rozlišením nižším než femtoampéry. Systém 4200-SCS nabízí nejmodernější funkce dostupné v plně integrovaném systému pro měření charakteristik, včetně plnohodnotného PC se systémem Windows a dostatečným HDD.



Obr. 4.2: Analyzátor Keithley 4200-SCS.

Hlavní řídicí jednotkou je osobní počítač s dvoujádrovým procesorem Intel Core 2 Duo E640 pracující na frekvenci 2,13 GHz a 2 GB RAM paměti v duálním módu. Data se ukládají na disk o kapacitě 500 GB. Operační systém je 32 bitový MS

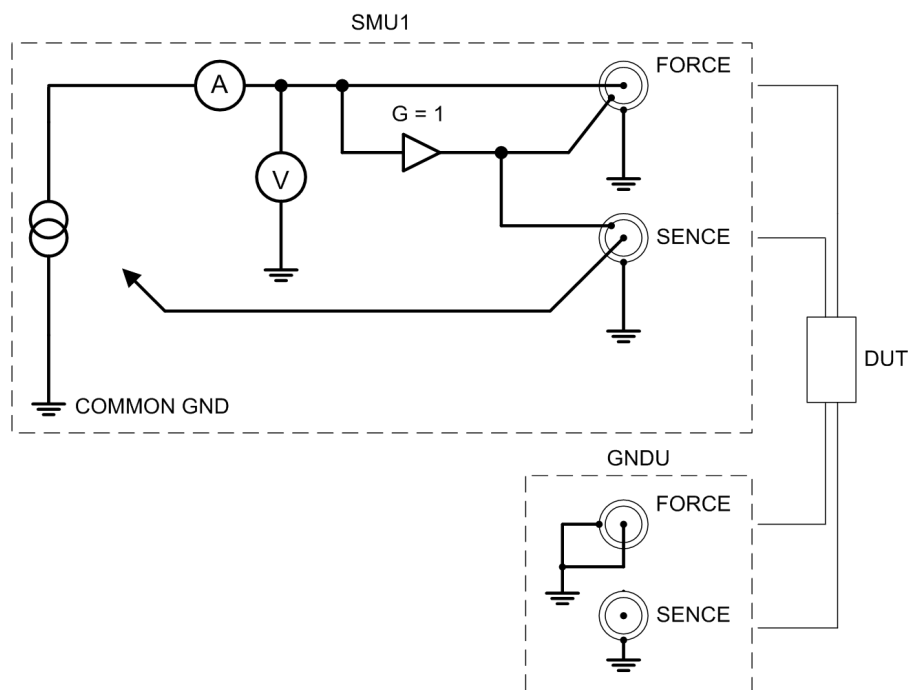
Windows XP. Pro jednoduché ovládání je možno připojit klávesnici a myš pomocí USB 2.0. Uživatel má k dispozici i LCD monitor.

Jedná se o velmi komplexní zařízení, které umožňuje celou řadu uživatelských módů a popis je uveden pouze pro potřeby měření odporů mezi kontakty. Pro účely tohoto měření je využívána zdrojová jednotka s maximálním výstupním napětím 210 V a proudem 100 mA. Obvykle je nastavován proud a je měřeno napětí. Proud lze nastavit v sedmi rozsazích. S využitím proudového předzesilovače se citlivost zvýší až na 1,5 fA. Napětí je možno měřit s rozlišením 1 μ V.

Analýzátor je vybavený interaktivním programem pro testování KITE (Keithley Interactive Test Environment). Tato aplikace obsahuje velké množství předpřipravených modulů pro testování, které je možno upravit pro daná měření. Všechny výsledky měření lze ukládat na HDD a dále je zpracovávat.

4.1.3 Schéma zapojení

Zapojení pro měření odporů mezi kontakty solárního článku je znázorněno na obrázku 4.3. K propojení kontaktovací stanice a analyzátoru jsou využity triaxiální kabely. Jeden pár sond je připojen k jednotce GNDU ke konektorům Sense a Force. Druhý pár potom k jednotce SMU opět na konektory Sense a Force.



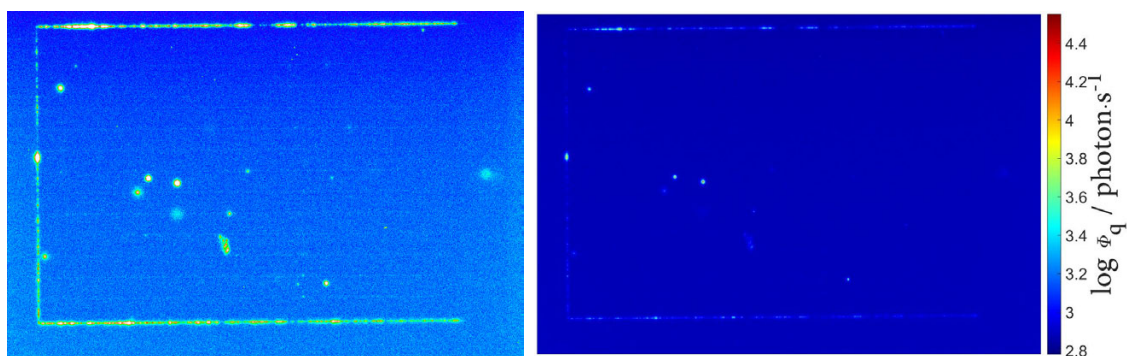
Obr. 4.3: Blokové schéma zapojení měřicí aparatury (DUT – Device Under Test).

4.2 Měření vyzařování z PN přechodu solárních článků

Jako další diagnostické metody studia solárních článků byla zvolena měření vyzařování z defektních oblastí CCD kamerou a termokamerou při elektrickém buzení solárního článku. Běžně se používá buzení jak v propustném, tak v závěrném směru. Propustný režim se jeví vhodný spíše pro charakterizaci větších ploch a neukázal se jako vhodný pro studium lokálních defektů. Naopak v závěrném stavu bývá proud PN přechodem tvořen převážně vedením proudu lokálními defekty a v těchto místech pak můžeme předpokládat velkou proudovou hustotu, což může vést až k lokálním průrazům. Díky tomu je tedy možné studovat lokální defekty a svody v těchto oblastech. Pro měření vyzařování ve viditelném spektru je použita speciální vědecká kamera G2-3200 a pro vyzařování v infračerveném spektru pak termokamera Micro-Epsilon TIM 160 Infrared Process Imager. Pro napájení vzorků jsou pak použity zdroje Keithley 6220 a Agilent E3649A.

4.2.1 Měření vyzařování ve viditelném spektru

Pro měření vyzařování ve viditelném spektru z PN přechodu solárních článků byla použita vědecká CCD kamera G2-3200 vybavená detektorem Kodak KAF s tzv. Full Frame (FF) architekturou. U této architektury je prakticky celá plocha pixelů CCD čipu vystavena světlu. Z tohoto důvodu má tento typ detektorů velmi vysokou kvantovou účinnost. Konkrétní typ čipu použitého u modelu G2-3200 je 3,2 MPx CCD Kodak KAF-3200ME. Umožňuje rozlišení 2184×1472 pixelů, velikost jednoho pixelu je $(6,8 \times 6,8) \mu\text{m}$. Temný proud optického snímače a jediného pixelu je při teplotě $T = 0^\circ\text{C}$ $0,8 \text{ e/s}$ a k jeho zdvojnásobení dojde při nárůstu teploty o 6°C . Čip je



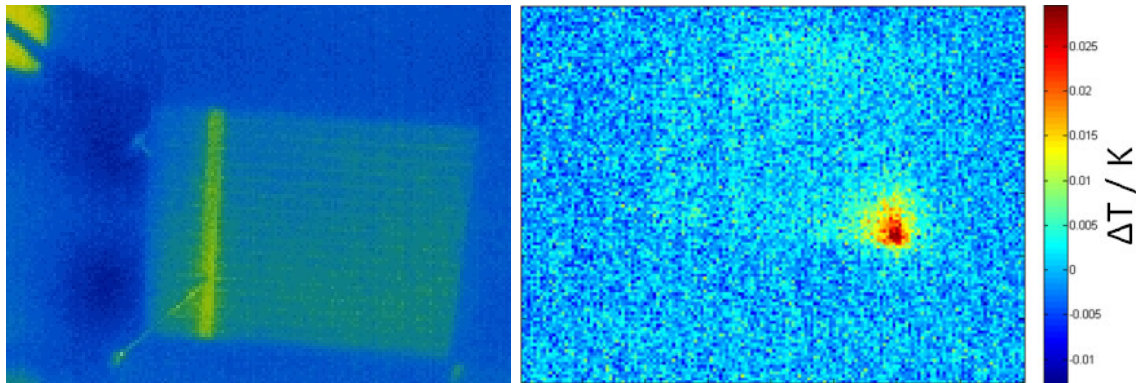
Obr. 4.4: Snímek z CCD kamery, vzorek A3606-11, $U_R = 25,4 \text{ V}$, $I_R = 40 \text{ mA}$, čas expozice 60 s, vlevo snímek z programu SIMS, vpravo pak tentýž snímek zpracovaný v programu MATLAB.

chlazen regulovaným dvojitým systémem z Peltierových článků, který dokáže ochladit CCD čip až o $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ pod okolní teplotu, přitom pracovní teplota běžně dostačuje $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Velmi dobrá je dynamika elementárních obrazových bodů s využitelným rozsahem až 16 bitů. Kameře je předřazen objektiv s clonovým číslem F1.2 a světelností 41,7 mm. Měření je možno provádět v rozsahu vlnových délek 300 nm až 1100 nm. Pro tento interval uvádí výrobce střední hodnotu kvantové účinnosti 0,51, přitom špičková hodnota kvantové účinnosti je 0,82 na vlnové délce 647 nm. Vlastní kamera je uzavřena v opticky těsné komoře, kde je umožněno snímat vzorky. Posuv kamery pro zaostřování je zajištěn krokovými motory. Kamera je připojena přes USB k počítači, kde jsou obrazy zpracovávány v programu SIMS, který je ke kameře dodáván. Obraz je možno zpracovávat dále v programu MATLAB, kde je možno například přepočítat jednotlivé pixely na hodnoty vyzařování ve fotonech za sekundu.

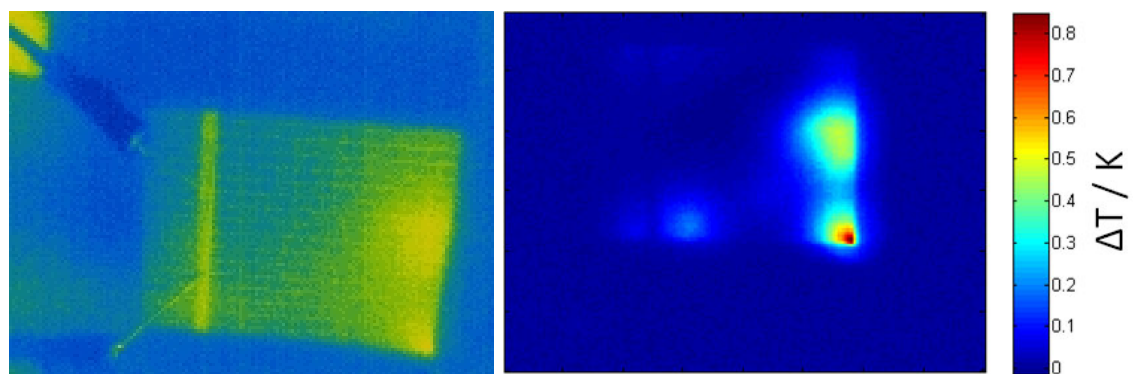
4.2.2 Měření vyzařování v infračerveném spektru

Pro měření teplotních charakteristik je použita termokamera Micro-Epsilon TIM 160 Infrared Process Imager. Detektor kamery umožňuje optické rozlišení 160×120 pixelů a vysoce výkonná optika garantuje přesné měření teploty cílových objektů ve velikosti od 1,5 mm. IR kamera má široký teplotní rozsah od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ a spektrální rozsah od $7,5\text{ }\mu\text{m}$ do $13\text{ }\mu\text{m}$. Teplotní citlivost je velmi dobrá, pohybuje se okolo $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, což umožňuje odhalit i velmi nepatrnou teplotní změnu v místě defektu. Kamera je připojena pomocí USB 2.0, je vybavena obslužným softwarem.

Pro zlepšení teplotní citlivosti a přesnější zobrazení teplotního rozložení měřených vzorků je kamera použita v lock-in režimu. To znamená, že měřený vzorek je pulsně napájen závěrným napětím nebo proudem a kamera synchronně s pulsy napětí/proudu snímá daný vzorek. Výsledný obraz je pak zobrazením rozdílů teplot mezi stavem kdy je napájen a kdy je nezatížen. Tímto je zlepšena citlivost kamery až o řád. To můžeme vidět na obr. 4.5, kde vlevo je vzorek PL11 změřený běžně termokamerou a ohřev v pravém spodním rohu není při závěrném napětí 4 V prakticky pozorovatelný, kdežto na obrázku vpravo, při použití kamery v lock-in režimu můžeme vidět patrný ohřev v defektní oblasti článku. Další obr. 4.6 nám ukazuje tentýž vzorek PL11, tentokrát při závěrném napětí $U_R = 14\text{ V}$. Zde již lze na záběru přímo z termokamery (vlevo) pozorovat ohřev v defektní oblasti v pravém dolním rohu měřeného vzorku, nicméně na snímku z režimu lock-in můžeme vidět, že tato metoda nám umožní vidět i další oblasti s lokálním ohřevem. Je tedy zřejmé, že použitým přístupem se nám podařilo značně zlepšit výrobcem uváděnou teplotní citlivost a měření je tak mnohem přesnější.



Obr. 4.5: Ukázka snímků z termokamery Micro-Epsilon TIM 160, vzorek PL11, $U_R = 4\text{ V}$, vlevo je snímek přímo z kamery, vpravo pak zobrazení v režimu lock-in.



Obr. 4.6: Ukázka snímků z termokamery Micro-Epsilon TIM 160, vzorek PL11, $U_R = 14\text{ V}$, vlevo je snímek přímo z kamery, vpravo zobrazení v režimu lock-in.

4.3 Měření VA charakteristik solárního článku při osvětlení

Měření zatěžovacích charakteristik je jedním ze základních měření pro posouzení kvality solárního článku. Z této charakteristiky můžeme určit všechny důležité parametry jako jsou sériový odpor R_S , paralelní odpor R_P , maximální výkon P_{\max} , fill faktor FF a také účinnost η . Měření VA charakteristiky osvětleného solárního článku probíhá postupným zatěžováním modulu (a odvedením výkonu) z režimu naprázdno až do zkratového proudu. Aby bylo možné zaručit konstantní osvětlení nezávislé na hodině, měsíci a počasí, používají se tzv. solární simulátory. Normy definují třídy solárních simulátorů A-C v závislosti na shodě spektra simulátoru s referenčním spektrem, homogenitu osvětlení a časovou stabilitu. Pro průmyslové měření se používá tzv. Flash Test, kdy je VA charakteristika solárního panelu rychle změřena během záblesku lampy s přesně definovanými parametry. Vzhledem k tomu, že průmyslové testery jsou velice nákladná záležitost, pro potřeby mého výzkumu jsem

použil laboratorní aparaturu, kde jako zdroj světla slouží dostatečně silné výbojky. Jako zdrojová a měřicí jednotka je použita měřicí karta od National Instruments PXI-4130 Power SMU, základní parametry této karty jsou shrnuty níže.



Obr. 4.7: NI PXI-4130 Power SMU.

- Programovatelná měřicí jednotka (SMU),
- izolovaný výstup s rozsahem $\pm 6\text{ V}$ až $\pm 20\text{ V}$, $\pm 200\text{ }\mu\text{A}$ až $\pm 2\text{ A}$,
- 18-bitové rozlišení,
- proudová citlivost až 20 nA ,
- napěťová citlivost až $100\text{ }\mu\text{V}$,
- práce ve všech čtyřech kvadrantech.

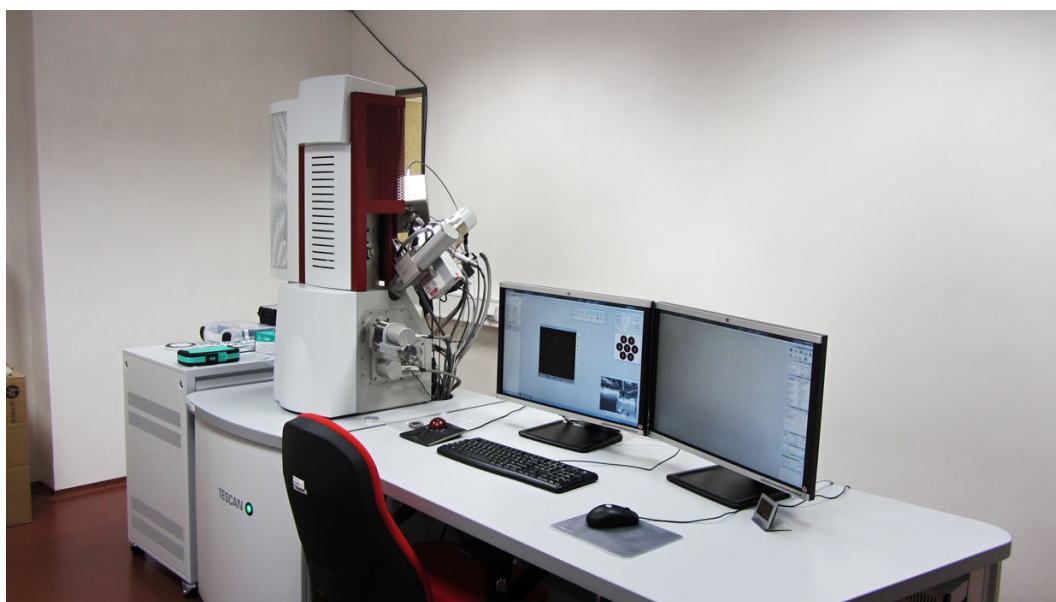
Měřicí karta je ovládána měřicím softwarem, který je vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW. Pro měření je také nezbytná stabilizace měřeného vzorku. Ta je zajištěna systémem s vodním okruhem. Pod elektrodou, ve které je nakontaktován měřený vzorek, je umístěn tepelný výměník do něž je vháněna voda se stabilizovanou teplotou. Je zřejmé, že tato měřicí aparatura nemá parametry průmyslových zábleskových testerů, nicméně pro můj laboratorní výzkum byla plně dostačující.

4.4 Elektronový mikroskop Lyra 3 FIB-SEM

Pro svůj výzkum jsem využíval elektronovou mikroskopii převážně pro zobrazení laserových zářezů, bližší pozorování některých lokálních defektů a také pro pokusy na solárních článcích s technologií FIB. Na ústavu fyziky je k dispozici elektronový mikroskop Lyra 3 FIB-SEM od firmy Tescan. Lyra 3 FIB-SEM je plně integrovaný systém, který obsahuje optiku elektronového i iontového svazku. Systém je založen na vysokorozlišovacím autoemisním elektronově-optickém tubusu s autoemisní vysoce

zářivou Schottkyho katodou. Technologie FIB, kterou je tento mikroskop vybaven, umožňuje: zobrazování povrchu vzorku, leptání (odprašování) struktury, iontovou implantaci a iontovou depozici. Hlavními přednostmi tohoto mikroskopu jsou:

- Schottkyho katoda s vysokou svítivostí pro dosažení vysokého rozlišení, nízkého šumu v obraze a vysoké kvality zobrazení při nízkých urychlovacích napětích.
- Unikátní tříčočkový optický systém nabízející řadu zobrazovacích režimů díky mezičočce IML.
- Vysoká rychlost snímání.
- Unikátní iontově optický tubus diferenciálně čerpaný pomocí 2 iontových vývěv pro dosažení velmi nízkého rozptylu iontů.
- Rychlé a snadné dosažení čistého pracovního vakua pomocí turbomolekulární a suché vývěvy; dosažení vysokého vakua v trysce pomocí iontové vývěvy.
- Snadné přepnutí do nízkovakuového módu pro pozorování nevodivých preparátů.
- Důmyslný, plně lokalizovaný software pro ovládání celého systému SEM/FIB a pořizování snímků a dokonalý systém pro jejich archivaci, zpracování a vyhodnocování.



Obr. 4.8: Elektronový mikroskop Lyra 3 FIB-SEM od firmy Tescan na UFYZ.

5 DIAGNOSTIKA A CHARAKTERIZACE LASEREM VYTVOŘENÝCH STRUKTUR

Následující část práce je zaměřena na prezentaci dosažených výsledků v rámci mého výzkumu. V několika kapitolách budou shrnuty dílčí výsledky s ohledem na vytyčené cíle. V následujících dvou kapitolách jsou uvedeny vybrané výsledky, které směřovaly ke stanovení komplexní metodiky pro charakterizaci laserem vytvořených struktur, která je uvedena v kapitole sedm.

5.1 Technické parametry použitého laseru

V první fázi mého výzkumu byly zkoumány vlivy různého nastavování parametrů pro laserové opracování solárního článku. Nutno podotknout, že samotná realizace laserových zářezů probíhala na Západočeské univerzitě v Plzni (ZČU), proto zde pouze nastíním základní parametry použitého laseru a vzhledem k tomu, že osobně jsem tuto techniku nepoužíval, nebude zde podrobně popsána. Jako zdroj laserového záření byl použit vláknový laser SPI, SP-20P, s řídicí elektronikou a optikou v uspořádání MOPA. Zdroj může pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu. Uspořádání MOPA umožňuje řídit délku a frekvenci pulzů v širokém rozsahu. Tento typ zdroje laserového záření má vysokou účinnost, spolehlivost a nevyžaduje údržbu. Technické parametry jsou uvedeny v následujících tabulkách 5.1 a 5.2. Vzorky křemíkových solárních článků pro opracování laserem byly dodávány firmou Solartec.

Tab. 5.1: Technické parametry laserového zdroje.

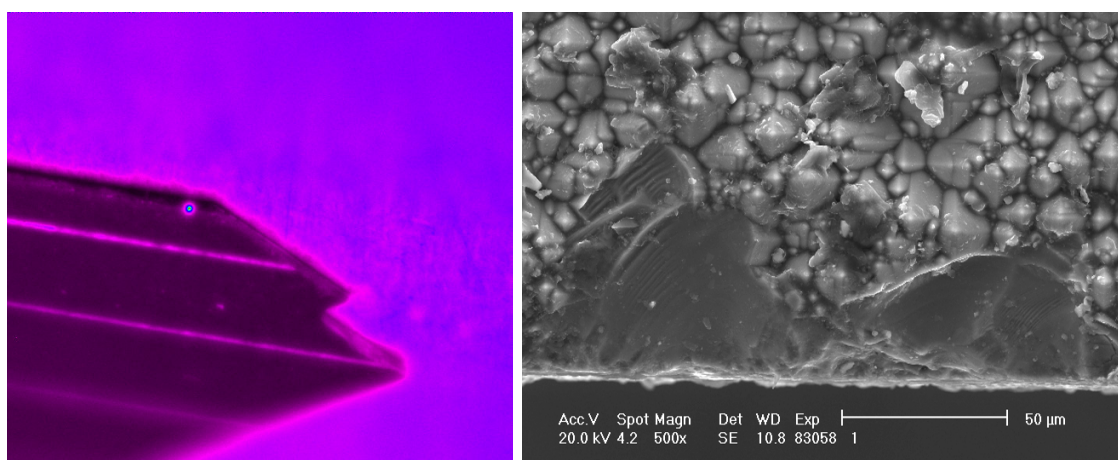
Název	SPI-SP-20P
Vlnová délka	1062±6 nm
Výkon	20 W
Rozsah výstupního výkonu	(10–100) %
Pracovní režim	Pulzní / Kontinuální
M2	1,98
Výkonová stabilita	< 2,9 %

Tab. 5.2: Parametry pulzů laserového zdroje.

Pulzní výkon	17,6 kW (při frekvenci 25 kHz a délce pulzu 200 ns)
Energie pulzu	0,8 mJ (při frekvenci 25 kHz a délce pulzu 200 ns)
Délka pulzu (FWHM)	(9–200) ns
Frekvence pulzů	(1–500) kHz

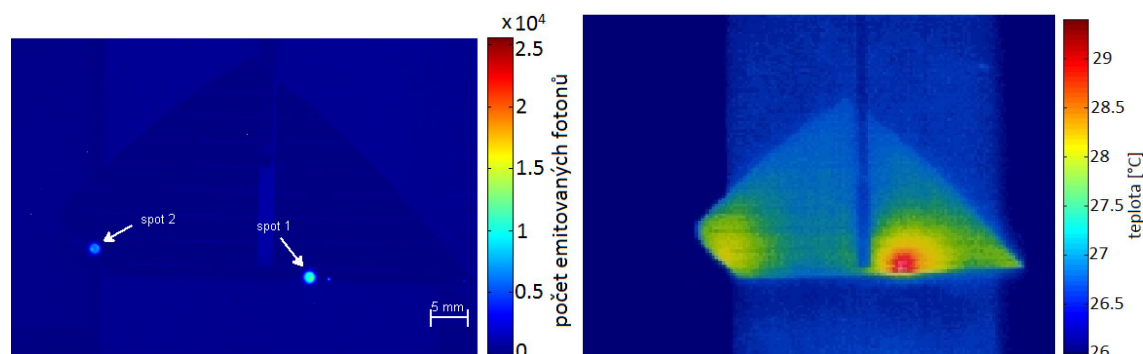
5.2 Studium hran solárních článků po řezání laserem

Pro charakterizaci sekundárně vytvořených struktur bylo nutné zkoumat velké množství vzorků a diagnostikovat jejich defekty. V této části výzkumu bylo analyzováno velké množství defektů a byly zkoumány korelace mezi jednotlivými metodami diagnostiky. Zde jsem věnoval velkou pozornost skupině defektů, které se vyskytují na hranách solárních článků a z výzkumu jasně vyplývá, že je velký problém v nedokonalosti opracování hran výrobcem. Příklad takového defektu je na obr. 5.1. Další výsledky deklarují negativní vliv těchto defektů na životnost článků. Obr. 5.2



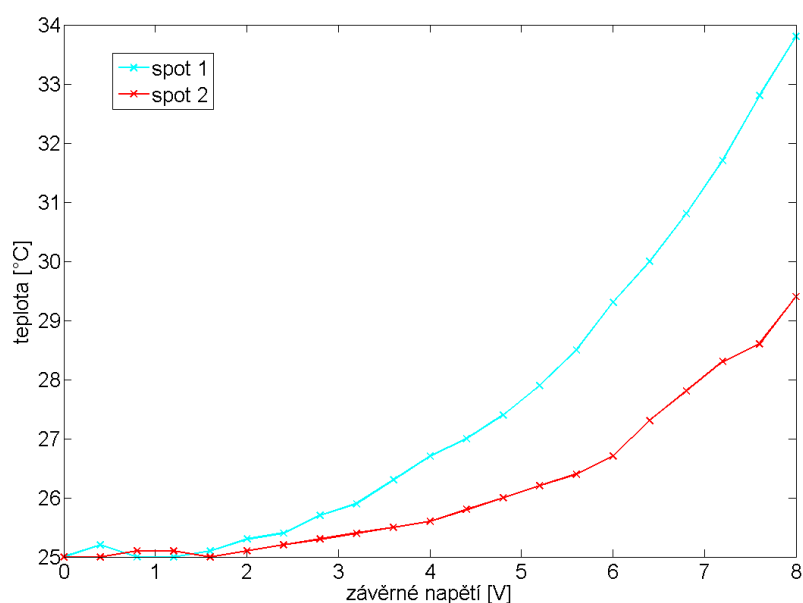
Obr. 5.1: Detail vyzařování defektu na hraně solárního článku, vzorek K22, CCD kamera (vlevo), detail defektu na hraně solárního článku, vzorek K22 (vpravo).

ukazuje výrazný ohřev v defektních oblastech a korelaci mezi vyzařováním ve viditelném spektru (CCD kamera) a tepelným vyzařováním (termokamera) v místě defektu. Z grafu na obr. 5.3, který zobrazuje teplotní závislost na závěrném napětí je pak zřejmý vysoký nárůst teploty v těchto defektech se stoupajícím závěrným napětím. Lze předpokládat, že při vyšších závěrných napětích může dojít ke kompletní destrukci vzorku. Zde je nutné zmínit, že solární článek se do závěrného stavu v prů-



Obr. 5.2: Ukázka vzorku s defekty nacházejících se na hraně solárního článku, snímek vlevo zachycený CCD kamerou, $U_R = 6$ V, vpravo pak snímek pořízený termokamerou, $U_R = 6$ V.

běhu provozu v solárních panelech může ocitnout v důsledku částečného zastínění solárního panelu. Jak ukazují výše zmíněné výsledky, opracování hran křemíkových



Obr. 5.3: Závislost teploty v defektní oblasti na závěrném napětí, vzorek K22.

solárních článků není ideální. Ke zlepšení kvality by mělo přispívat právě využití laserových procesů pro zpracování hran.

V rámci měření bylo vypořazováno, že mnohem častěji se tyto defekty objevují na hranách vzniklých průmyslovým opracováním, než na hranách, které vznikly zlomením solárního článku. Z tohoto zjištění vzešel nápad vytvoření hrany solárního článku takovým způsobem, že článek je nejprve naříznut laserem a následně doložen. Pro tento pokus jsem měl k dispozici sadu běžných vzorků monokrystalických solárních článků od firmy Solartec. Dodané vzorky byly opracovány na ZČU, kde

jím byly vytvořeny hrany technikou naříznutí laserem a následného dolomení pro zvolené parametry laseru, zároveň však byly tyto vzorky použity pro testovací izolační zářezy, které byly realizovány různým nastavením laseru. Parametry laseru pro naříznutí hrany před dolomením jsou shrnuty v tabulce 5.3 Jako diagnostické

Tab. 5.3: Parametry laseru pro naříznutí hrany před dolomením.

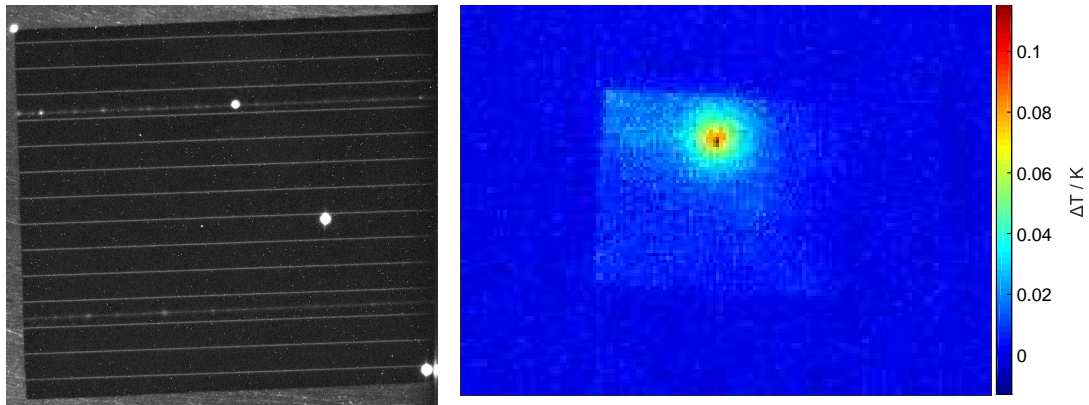
Výkon [%]	95
Skenovací rychlost [mm/s]	100
Opakovací frekvence pulzů [kHz]	25
Délka pulzu [ns]	200
Počet přejezdů [-]	1

metody studia takto opracovaných hran solárních článků jsem zvolil měření vyzařování z defektních oblastí CCD kamerou a termokamerou při elektrickém buzení článků v závěrném směru. Zpětný směr byl volen proto, že při zatěžování struktury solárního článku tímto způsobem je možné předpokládat průchod proudu především lokálními kanály v okolí PN přechodu a hran a je tedy možné studovat lokální defekty a svody v těchto oblastech. Teplota vzorků při měření byla ve všech případech 27 °C. Celkem bylo uvedenými metodami studováno pět sad vzorků, kdy pro každou sadu byly nastaveny jiné parametry laseru pro vytvoření izolačních zářezů. Každá sada obsahovala pět vzorků, z důvodu vykazování stejného chování u vzorků z totožné sady je u každé uvedena pouze ukázka měření jednoho z nich. Velikost každého vzorku je 45 × 36 mm.

Vyzařování ze solárních článků v závěrném stavu bylo měřeno CCD kamerou a termokamerou (obr. 5.4 až 5.8) při napětí na solárních člancích $U_R = 6 \text{ V}$ a tomu odpovídajících proudech $I_R \approx 5 \text{ mA}$.

Tab. 5.4: Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 1.

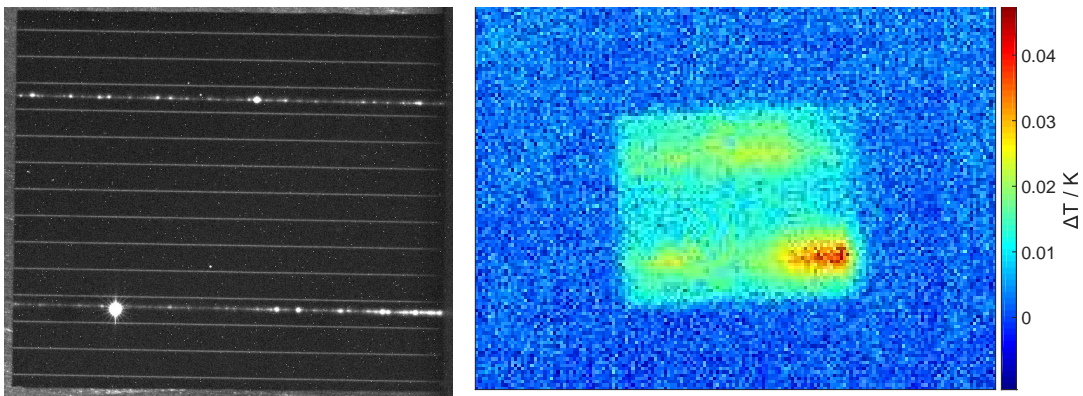
Výkon [%]	95
Skenovací rychlost [mm/s]	2275
Opakovací frekvence pulzů [kHz]	65
Délka pulzu [ns]	65
Energie pulzu max. [mJ]	0,31



Obr. 5.4: Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 1₂, $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů mezi kontakty viz tab. 5.4.

Tab. 5.5: Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 2.

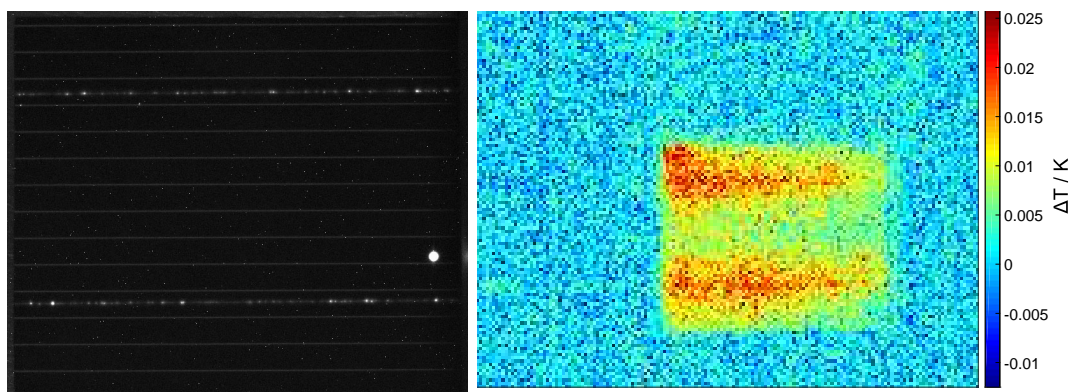
Výkon [%]	95
Skenovací rychlost [mm/s]	2275
Opakovací frekvence pulzů [kHz]	125
Délka pulzu [ns]	30
Energie pulzu [mJ]	0,16



Obr. 5.5: Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 2₂, $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů mezi kontakty viz tab. 5.5.

Tab. 5.6: Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 3.

Výkon [%]	95
Skenovací rychlost [mm/s]	2275
Opakovací frekvence pulzů [kHz]	250
Délka pulzu [ns]	15
Energie pulzu [mJ]	0,08

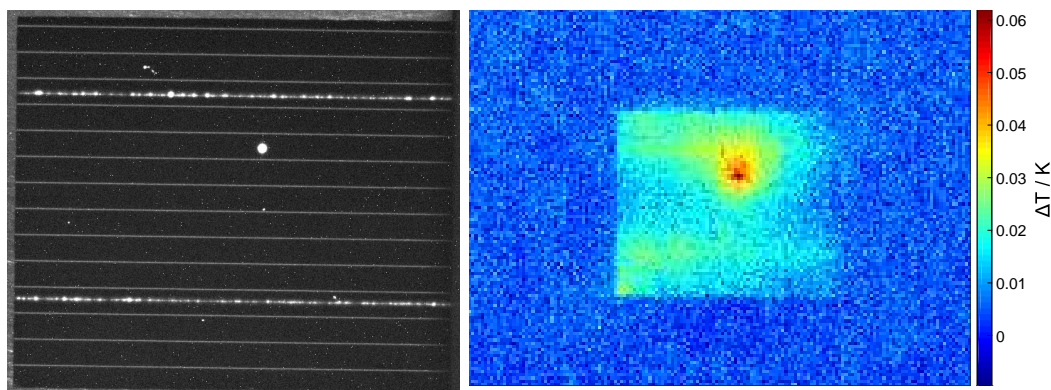


Obr. 5.6: Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 3₁, $U_R = 6$ V, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů viz tab. 5.6.

Tab. 5.7: Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 4.

Výkon [%]	95
Skenovací rychlost [mm/s]	2275
Opakovací frekvence pulzů [kHz]	375
Délka pulzu [ns]	12
Energie pulzu [mJ]	0,053

Na snímcích z termokamery (na stupnici je uvedena teplota ve °C) a ze CCD kamery je vidět, že při použitém budicím napětí hrany nevykazují prakticky žádnou aktivitu. Nejsou zde tedy zřejmě významné vodivé kanály, případně další defekty, které by se projevovaly lokálním ohřevem, nedochází ani ke generaci záření v optické oblasti. Zde je třeba upozornit, že v důsledku požadavku nedestruktivnosti měření a v důsledku značné optické aktivity rýh jsem volil pro jistotu nižší budicí



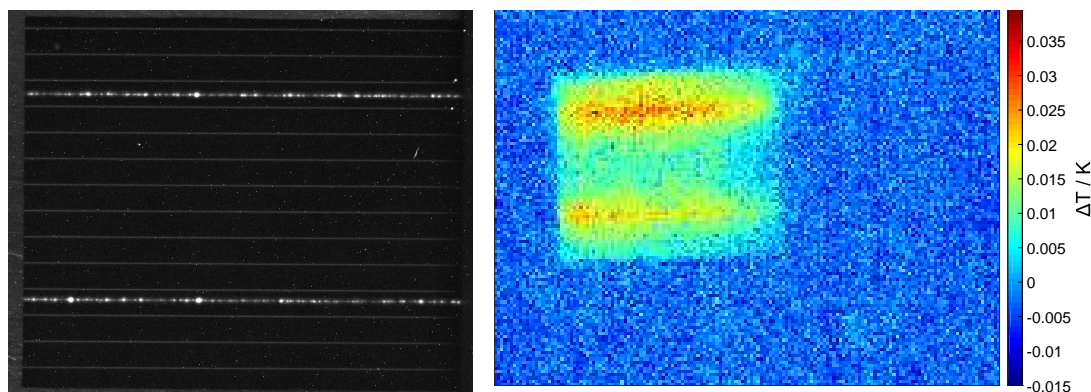
Obr. 5.7: Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 4_2 , $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů mezi kontakty viz tab. 5.7.

Tab. 5.8: Parametry použitého laseru pro vytvoření izolačních zářezů mezi kontakty vzorků ze sady 5.

Výkon [%]	95
Skenovací rychlost [mm/s]	2275
Opakovací frekvence pulzů [kHz]	500
Délka pulzu [ns]	12
Energie pulzu [mJ]	0,04

napětí. Zvýšením tohoto napětí by pravděpodobně mohlo dojít ke zvýšení aktivity případných defektů na hranách.

K určitému ohřevu (v řádu setin $^{\circ}\text{C}$) dochází v oblasti rýh, což značí existenci vodivých kanálů protínajících PN přechod. Vzhledem k poměrně malé prostorové rozlišovací schopnosti termokamery je možné, že v případě malých oblastí ohřevu může být skutečný lokální ohřev v jednotlivých velmi malých oblastech vyšší. Nicméně vodivé kanály se podle těchto výsledků nejeví jako příliš masivní. Zajímavá je však existence výrazné optické aktivity rýh, která je zřejmá ze snímků CCD kamery. Zde se pravděpodobně bude jednat o rekombinační záření z jednotlivých oblastí defektů. Přesný mechanismus není z provedených měření možné zjistit. Jedna z pravděpodobných variant jsou lokální lavinové průrazy v oblasti defektů (např. dislokací) v důsledku lokálního snížení potenciálové bariéry v oblasti PN přechodu. V jednotlivých lokálních oblastech se však mohou projevovat různé mechanismy vyzařování. Takovéto chování rýh nebylo při předchozích měřeních pozorováno. V ostatních mě-



Obr. 5.8: Charakterizace CCD kamerou (vlevo) a termokamerou (vpravo), vzorek 5₁, $U_R = 6\text{ V}$, parametry použitého laseru pro vytvoření zářezů mezi kontakty viz tab. 5.8.

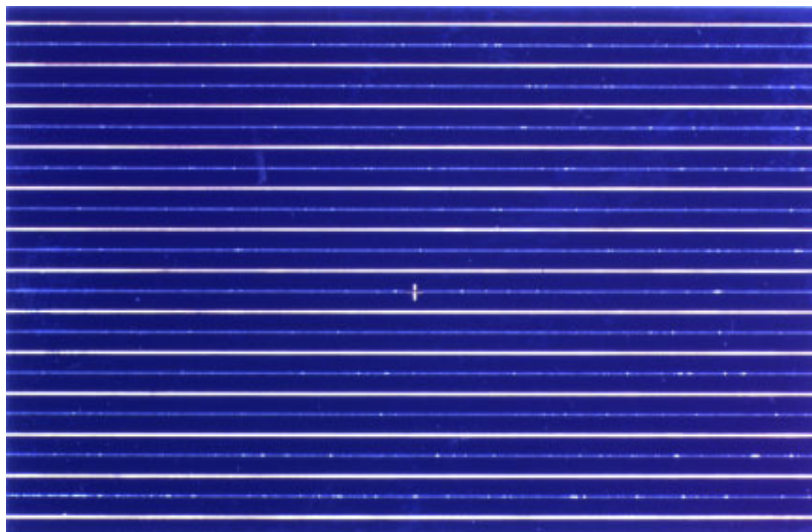
řeních, jak bude i ukázáno v dalších kapitolách, rýhy vykazovaly výrazně ohmické chování, které způsobilo lokální zánik potenciálové bariéry (a tím i PN přechodu) a umožnilo tak vznik proudů tekoucích kanály protínajícími PN přechod. V těchto oblastech pak nedocházelo ke generaci záření v optické oblasti. Ve výsledku by pozorovaná optická aktivita rýh mohla být interpretována spíše pozitivně. Mohla by totiž značit, že v okolí rýh zůstal zachován PN přechod, který sice obsahuje velké množství defektů, ale v zásadě je funkční. Zde se však jedná spíše o spekulaci, k ověření tohoto tvrzení by bylo třeba dalších měření.

Závěrem této kapitoly však můžeme tvrdit, že na základě studia těchto sad článků pomocí měření vyzařování termokamerou a CCD kamerou lze konstatovat, že provedený proces opracování hran se jeví jako kvalitní. Uvedenými metodami nebyly nalezeny významnější defektní oblasti v okolí hran, které by způsobovaly vznik vodivých kanálů. Co se týká laserových zářezů mezi kontakty určených primárně pro izolaci hran, které byly realizovány na této sadě vzorků, nelze jednoznačně posoudit jejich kvalitu. Nicméně studiem a charakterizací takto vytvořených struktur se bude zabývat následující kapitola, kde budou uvedena další měření vhodnější pro diagnostiku laserových zářezů a posouzení jejich kvality.

5.3 Charakterizace laserem vytvořených struktur určených pro izolaci hran

Jak už bylo několikrát zmíněno v této práci, laserové technologie mají v oblasti křemíkových solárních článků široké využití. Tato kapitola se bude zabývat využitím laserové technologie pro izolaci hran. Tato izolace pomocí zářezů vytvořených laserem v blízkosti hran se u průmyslově vyráběných křemíkových článků používá několik let. Nicméně v současné době neexistují publikace, které by se věnovaly charakterizaci těchto struktur a určily jejich kvalitu či vliv na chování solárního článku. Cílem prací uvedených v této kapitole bylo tedy především zvolit vhodný přístup a měřicí metody pro charakterizaci těchto struktur. Všechna měření by pak měla vést ke stanovení náhradního elektrického modelu laserem vytvořené struktury na křemíkovém solárním článku a následně stanovit vhodnou metodiku pro diagnostiku sekundárně vytvořených struktur v PN přechodu solárních článků.

Prvním krokem bylo vymyslet přístup k charakterizaci. Problém byl, že laserové izolační zářezy, které se vyskytují co nejbližší hran solárního článku, je nemožné rozumným způsobem kontaktovat. Proto jsem zvolil přístup, kdy solární článek standardní velikosti byl rozřezán na menší vzorky a laserové izolační zářezy pak byly definovaně realizovány mezi jednotlivými prstovými kontakty solárního článku. To umožní precizní kontaktování a možnost určit příspěvek těchto vytvořených struktur na chování solárního článku. Ukázka takto připraveného vzorku je na obr. 5.9.



Obr. 5.9: Ukázka připraveného vzorku pro charakterizaci laserových zářezů, vzorek PL45.

V první sadě měření byly připraveny vzorky pro měření na ZČU, kde byl komerční polykrystalický křemíkový solární článek rozřezán na vzorky o rozměrech 45×36 mm. Tyto vzorky byly pak rozděleny do třech sad, kdy každá byla opracována s jinými parametry laseru, tyto uvádí tab. 5.9.

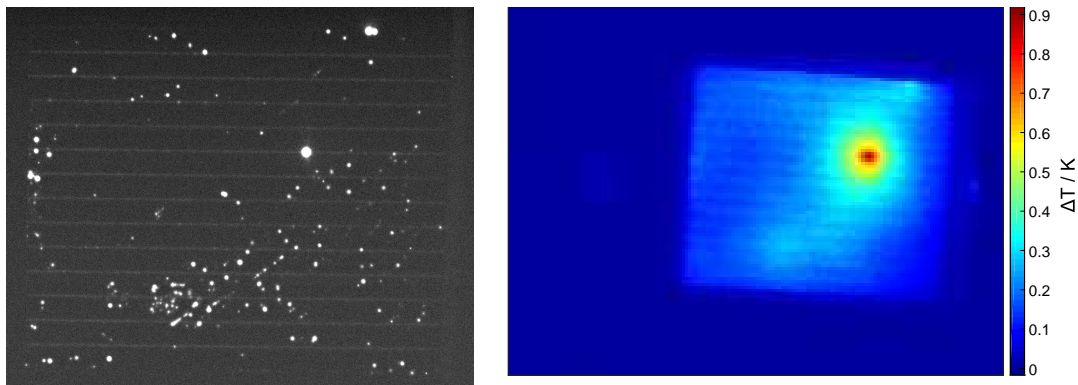
Tab. 5.9: Parametry použitého laseru pro realizaci laserových zářezů na sady vzorků ID1, IO1 a IO2.

Název sady	ID1	IO1	IO2
Výkon laseru [%]	90	30	60
Skenovací rychlost [mm/s]	250	1500	5000
Opakovací frekvence pulzů [kHz]	10	50	150

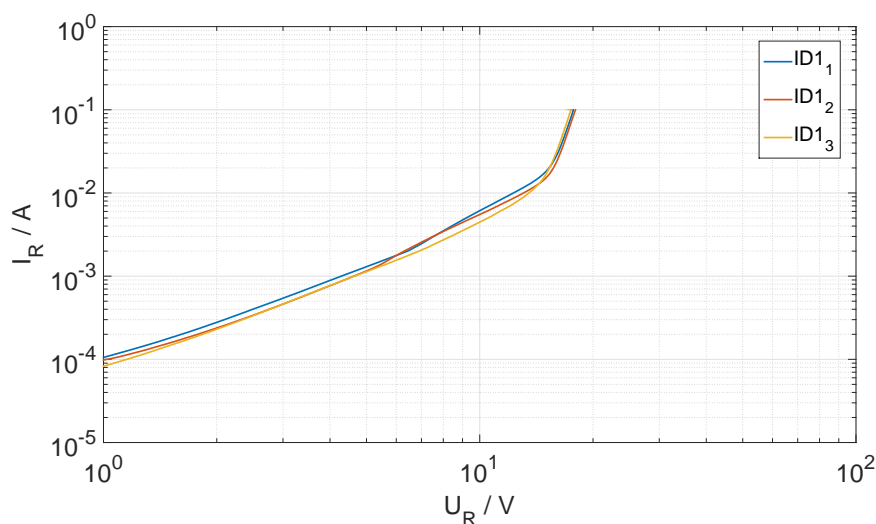
Jako diagnostické metody studia solárních článků byla zvolena měření vyzařování z defektních oblastí CCD kamerou a termokamerou v režimu lock-in při elektrickém buzení článků v závěrném směru. Dále byly měřeny VA charakteristiky vždy mezi dvojicí sousedních kontaktů, mezi nimiž byl vytvořen zářez. Byly také měřeny VA charakteristiky celých článků v závěrném stavu a efektivní hodnota úzkopásmového šumového proudu v závěrném stavu. Tato měření byla doplněna měřením zatěžovací charakteristiky při konstantním osvětlení, ze které byly odečteny základní parametry článků. Teplota vzorků při měření byla ve všech případech stabilizována na 27°C .

Podívejme se nyní na sadu vzorků ID1. Jak můžeme vidět z tabulky 5.9, pro vytvoření laserových zářezů na této sadě vzorků byly použity parametry výkon laseru $P = 90\%$, opakovací frekvence pulzů $f = 10$ kHz a skenovací rychlost byla $R = 250$ mm/s. Vzhledem k velkému množství měřených vzorků zde budou předloženy pouze některé naměřené výsledky, které budou ukazovat typické chování dané sady vzorků. Obr. 5.10 ukazuje vzorek ID1₁ a jeho vyzařování ve viditelném (měření CCD kamerou) a v infračerveném spektru (měřeno termokamerou) při elektrickém buzení v závěrném směru, $U_R = 14,4$ V, $I_R = 20$ mA. Ze snímků je zřejmé, že vytvořené zářezy v tomto případě nevykazují žádnou zřetelnou optickou ani tepelnou aktivitu. Měření nasvědčují, že v tomto případě dochází v místě zářezu ke kompletnímu odstranění PN přechodu.

Graf 5.11 znázorňuje naměřené voltampérové charakteristiky v závěrném směru u vybraných vzorků ze sady ID1. Aby se předešlo degradaci vzorků v důsledku měření, byl stanoven maximální zpětný proud 100 mA. Z průběhu charakteristik lze konstatovat, že v rozsahu měření do 10 V se nevyskytují prudké změny proudu, což nasvědčuje tomu, že v místě laserových zářezů nedochází k významnějším lokálním průrazům.



Obr. 5.10: Vyzařování ve viditelném (vlevo) a v infračerveném spektru (vpravo) ze vzorku ID1₁ při elektrickém buzení článků v závěrném směru, $U_R = 14,4$ V, $I_R = 20$ mA.

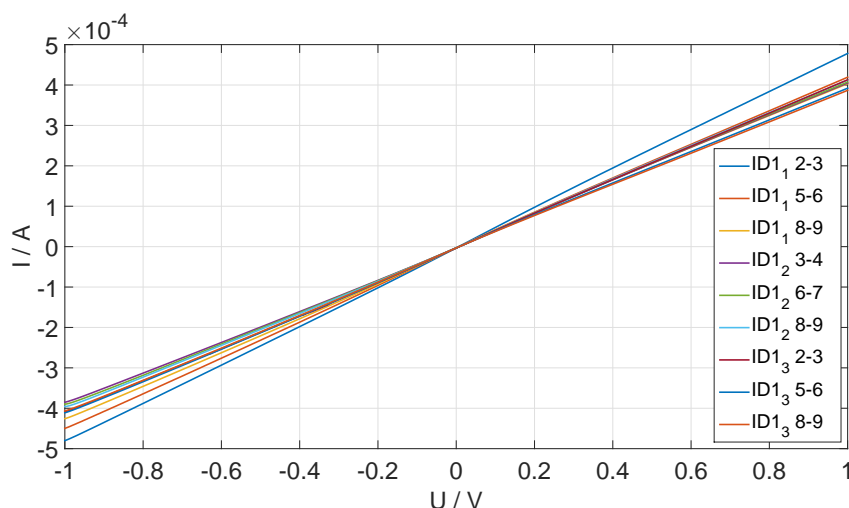


Obr. 5.11: VA charakteristiky v závěrném směru u vybraných vzorků ze sady ID1, logaritmické zobrazení, měřeno v temném prostředí při teplotě 27 °C.

Další měření nám ukazují, že zářezy u skupiny vzorků ID1 velmi dobře elektricky izolují. Toto tvrzení vychází z měření odporu mezi dvěma sousedními kontakty. Vybraná měření jsou ukázána na obr. 5.12, zde jsou vidět měřené VA charakteristiky, ze kterých je proložením zjištěn odpor. Z proložení měřeného průběhu lineární funkcí je zřejmé, že v použitém rozsahu napětí -1 V až 1 V je měřená závislost velmi dobře symetrická a lineární. Odpor oblastí mezi kontakty získaný proložením VA charakteristik se u vzorků ze sady ID1 pohybuje okolo 2 k Ω , přesné hodnoty u vybraných vzorků jsou uvedeny v tabulce 5.10. Pro porovnání, odpor oblastí mezi sousedními kontakty u vzorku solárního článku stejné velikosti se pohybuje v řádu jednotek ohmů. Můžeme tedy říct, že z hlediska izolace sloužící pro oddělení vodivé vrstvy

se parametry laseru zvolené pro realizaci zářezů pro skupinu vzorků ID1 jeví jako vhodné.

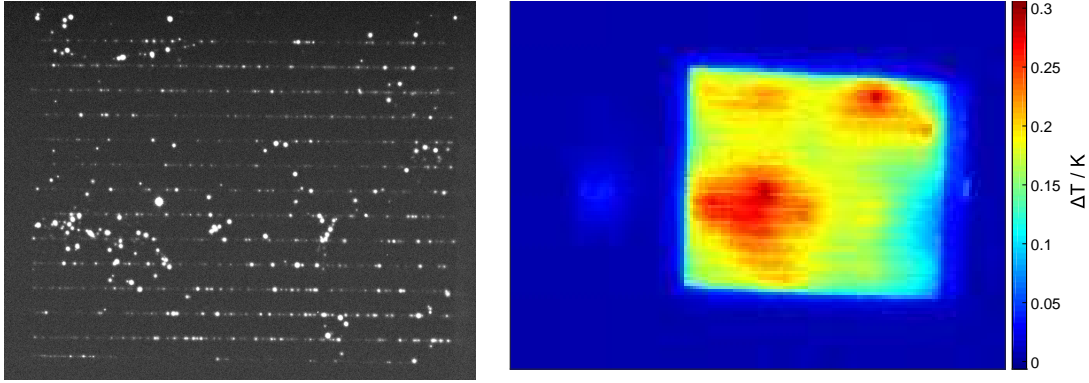
Zaměřme se na skupinu vzorků IO1. Zde, jak můžeme vidět z tabulky 5.9, pro vytvoření laserových zářezů na této sadě vzorků byly použity parametry výkon laseru $P = 30 \%$, opakovací frekvence pulsů $f = 50 \text{ kHz}$ a skenovací rychlost $R = 1500 \text{ mm/s}$. U této sady vzorků vše nasvědčuje tomu, že parametry laseru oproti sadě ID1 nebyly dostatečné pro vytvoření izolačních zářezů. Toto tvrzení je zřejmé již ze snímku 5.13, kde můžeme vidět vyzařování ve viditelném (vlevo) a v infračerveném spektru (vpravo) ze vzorku IO1₂ při elektrickém buzení článků v závěrném směru, $U_R = 15,58 \text{ V}$, $I_R = 20 \text{ mA}$. U vzorků z této skupiny vyzařování v závěrném stavu PN přechodu ukazuje na velké množství lokálních defektů v zářezech. Je zde pravděpodobné, že zůstal alespoň částečně zachován PN přechod. Zajímavé je, že na měření termokamerou se aktivita v laserových zářezech neprojevila, nicméně to může být tím, že ohřev v místech defektů v objemu vzorku potlačil drobný ohřev v místech laserových zářezů.



Obr. 5.12: Měření odporu mezi sousedními kontakty solárního článku s realizovanými laserovými zářezy, sada vzorků ID1, měřeno v temném prostředí při teplotě 27°C .

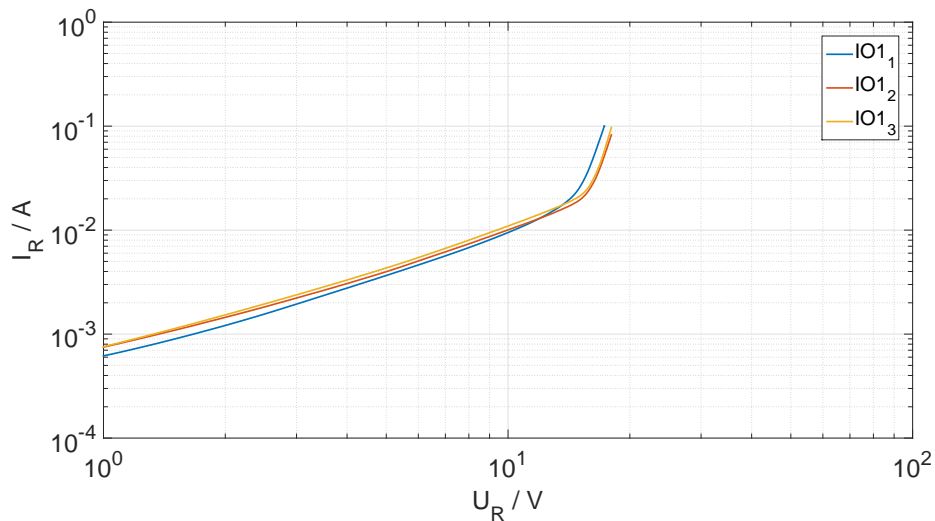
Tab. 5.10: Hodnoty odporu měřených mezi sousedními kontakty u vybraných vzorků ze sady ID1.

Vzorek	ID1 ₁ 2-3	ID1 ₁ 5-6	ID1 ₁ 8-9	ID1 ₂ 3-4	ID1 ₂ 6-7
R / Ω	2004,1	2420,1	2293,4	2464,7	2484,1
Vzorek	ID1 ₂ 8-9	ID1 ₃ 2-3	ID1 ₃ 3-4	ID1 ₁ 5-6	ID1 ₃ 8-9
R / Ω	2435,9	2400,8	2436,4	2483,0	2488,8



Obr. 5.13: Vyzařování ve viditelném (vlevo) a v infračerveném spektru (vpravo) ze vzorku IO1_2 při elektrickém buzení článků v závěrném směru, $U_R = 15,58 \text{ V}$, $I_R = 20 \text{ mA}$.

Na průběhu voltampérových charakteristik na obr. 5.14 vidíme velice podobný stav jako u sady vzorků ID1. Opět se zde v rozsahu měření do 10 V nevyskytují žádné prudké změny proudu, což nasvědčuje tomu, že v místě laserových zářezů nedochází k lokálním lavinovým průrazům. Zároveň je nutno podotknout, že oproti vzorkům ze stejné série, které nebyly laserově opracovány, po opracování proud vzrostl, což se dá vysvětlit vytvořenými kanály, které protínají přechod až do substrátu a povrchové stavy se zde účastní vedení proudu. Z toho důvodu lze čekat spíše kanály s ohmickým charakterem, které se projevují od nejnižších napětí, než kanály vzniklé průrazem. Toto potvrzují i znázorněné VA charakteristiky, na kterých se na žádném z měřených vzorků neobjevují nové průrazy (oblasti prudké změny proudu).



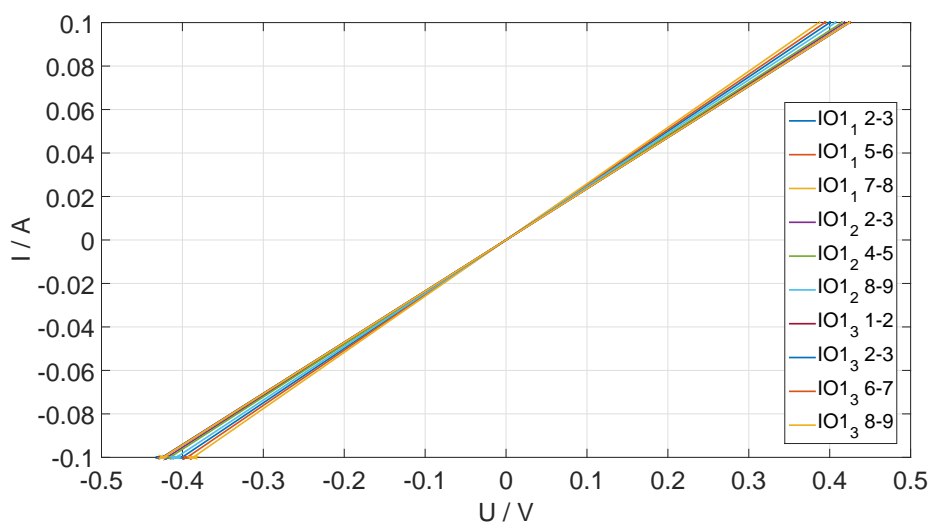
Obr. 5.14: VA charakteristiky v závěrném směru u vybraných vzorků ze sady IO1, logaritmické zobrazení, měřeno v temném prostředí při teplotě 27°C .

Měření odporu mezi kontakty solárního článku s realizovanými laserovými zářezy u vzorků ze sady IO1 ukázaly, že vytvořené struktury u této sady prakticky neizolují. Vybraná měření jsou ukázána na obr. 5.15, kde jsou vidět měřené VA charakteristiky, ze kterých je opět proložením zjištěn odpor. Charakteristiky jsou v měřeném rozsahu přibližně -0,4 V až 0,4 V (rozsah je zde omezen proudovou pojistkou 100 mA) prakticky lineární funkcí. Odpor oblastí mezi kontakty získaný proložením VA charakteristik je u vzorků ze sady IO1 se pohybuje okolo 4 Ω , přesné hodnoty u vybraných vzorků jsou uvedeny v tabulce 5.11. Z hodnot je tedy zřejmé, že realizované zářezy u skupiny vzorků IO1 nezvyšují žádným významným způsobem elektrickou izolaci a tedy takto nastavené parametry laseru se jeví jako nevhodné.

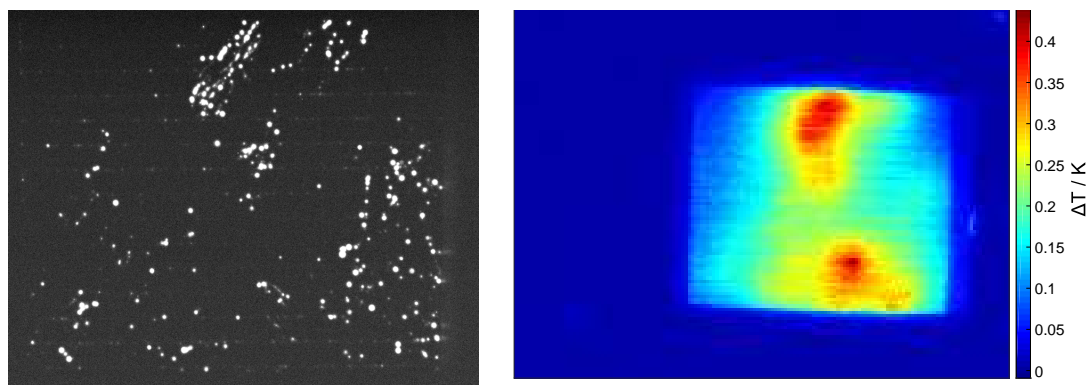
Tab. 5.11: Hodnoty odporu měřených mezi sousedními kontakty u vybraných vzorků ze sady IO1.

Vzorek	IO1 ₁ 2-3	IO1 ₁ 5-6	IO1 ₁ 7-8	IO1 ₂ 2-3	IO1 ₂ 4-5
R / Ω	4,00	3,94	3,86	4,19	4,15
Vzorek	IO1 ₂ 8-9	IO1 ₃ 1-2	IO1 ₃ 2-3	IO1 ₃ 6-7	IO1 ₃ 8-9
R / Ω	4,07	4,24	4,25	4,24	4,24

U sady vzorků IO2, kde byly pro realizované zářezy použity parametry výkon laseru $P = 60 \%$, opakovací frekvence pulsů $f = 150 \text{ kHz}$ a skenovací rychlost $R = 5000 \text{ mm/s}$, viz tabulka 5.9, je vyzařování ze zářezů v závěrném stavu PN pře-



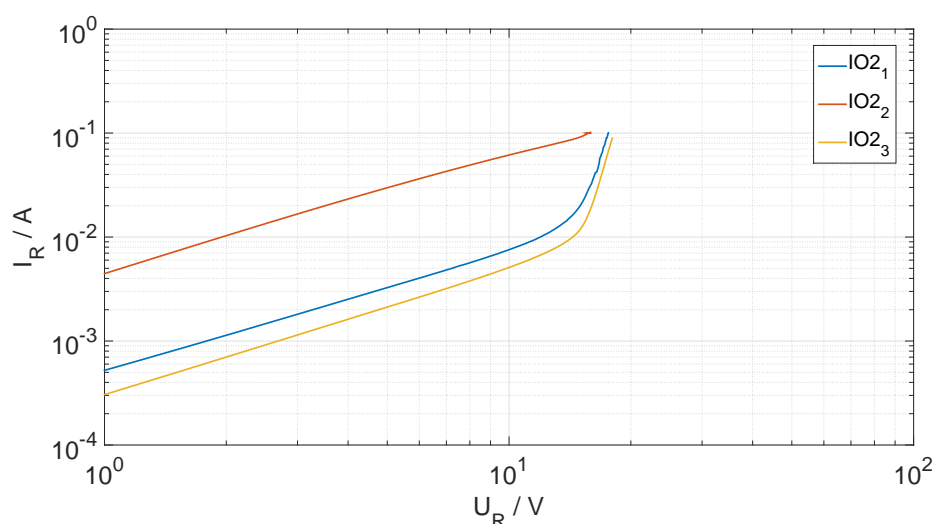
Obr. 5.15: Měření odporu mezi sousedními kontakty solárního článku s realizovanými laserovými zářezy, sada vzorků IO1, měřeno v temném prostředí při teplotě 27 °C.



Obr. 5.16: Vyzařování ve viditelném (vlevo) a v infračerveném spektru (vpravo) ze vzorku IO_2_3 při elektrickém buzení článků v závěrném směru, $U_R = 16,04 \text{ V}$, $I_R = 20 \text{ mA}$.

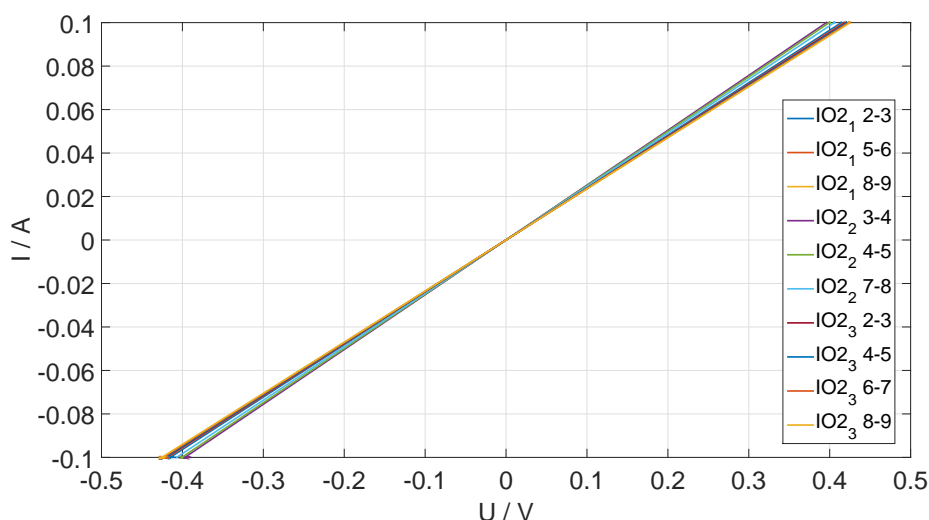
chodu homogenní a poměrně slabé, viz obr. 5.16 vzorku IO_2_3 při měření CCD kamerou (vpravo). Vyzařování v infračerveném spektru z oblasti zářezů opět nebylo pozorováno. U voltampérových charakteristik v závěrném směru, viz obr. 5.17, je situace velmi obdobná jako u předchozích sad vzorků, opět zde v rozsahu měření do 10 V nevyskytují žádné prudké změny proudu. Pouze vzorek IO_2_2 vybočuje svou charakteristikou, která se jeví jako závěrná charakteristika odpovídající vodivému kanálu, který nevzniká průrazem, ale je zde přítomen již při velmi malé intenzitě elektrického pole.

U měření odporu mezi sousedními kontakty je situace u sady IO_2 velice podobná



Obr. 5.17: VA charakteristiky v závěrném směru u vybraných vzorků ze sady IO_2 , logaritmické zobrazení, měřeno v temném prostředí při teplotě 27°C .

jako u sady IO1, tzn. že vytvořené struktury u této sady prakticky neizolují. Vybraná měření jsou ukázána na obr. 5.18, kde jsou vidět měřené VA charakteristiky, ze kterých je opět proložením zjištěn odpor. Charakteristiky jsou v měřeném rozsahu přibližně -0,4 V až 0,4 V (rozsah je zde omezen proudovou pojistkou 100 mA) prakticky lineární funkcí. Odpor oblastí mezi kontakty získaný proložením VA charakteristik se u vzorků ze sady IO1 pohybuje okolo 4 Ω , přesné hodnoty u vybraných vzorků jsou uvedeny v tabulce 5.12. Z hodnot je tedy zřejmé, že realizované zářezy u skupiny vzorků IO2 nezvyšují žádným způsobem elektrickou izolaci a tedy takto nastavené parametry laseru se jeví jako nevhodné.



Obr. 5.18: Měření odporu mezi sousedními kontakty solárního článku s realizovanými laserovými zářezy, sada vzorků IO2, měřeno v temném prostředí při teplotě 27 °C.

Tab. 5.12: Hodnoty odporu měřených mezi sousedními kontakty u vybraných vzorků ze sady IO2.

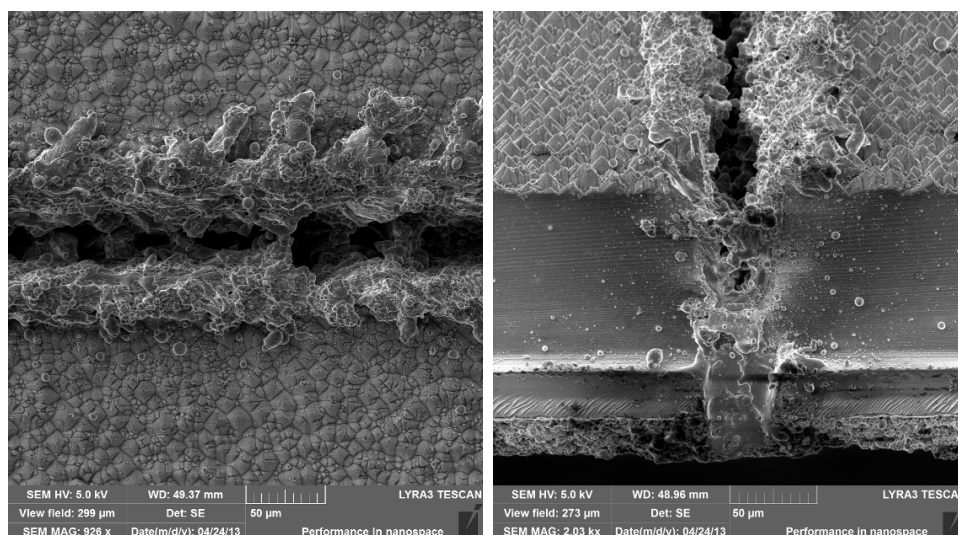
Vzorek	IO2 ₁ 2-3	IO2 ₁ 5-6	IO2 ₁ 8-9	IO2 ₂ 3-4	IO2 ₂ 4-5
R / Ω	4,15	4,18	4,23	3,96	4,00
Vzorek	IO2 ₂ 7-8	IO2 ₃ 2-3	IO2 ₃ 4-5	IO2 ₃ 6-7	IO2 ₃ 8-9
R / Ω	4,06	4,19	4,21	4,23	4,25

Závěrem této kapitoly bych shrnul, že nejlepší elektrickou izolaci mezi jednotlivými dvojicemi kontaktů tvoří zářezy u skupiny vzorků ID1, kde odpor mezi sousedními kontakty je cca 2,4 k Ω . Zářezy tvořené laserem ve zbylých dvou případech, skupina IO1 a IO2, neizolují – odpory mezi kontakty se neliší od neopracovaných

článků (cca $4\ \Omega$). U vzorků ze skupiny IO1 vyzařování v závěrném stavu PN přechodu ukazuje na velké množství lokálních defektů v zářezích. U zbylých dvou skupin je vyzařování ze zářezů homogenní, přitom u skupiny IO2 je poměrně slabé. Je pravděpodobné, že u skupin IO1 a IO2 zůstal alespoň částečně zachován PN přechod.

5.4 Studium rezistivity laserem modifikovaných oblastí

Velkým problémem u charakterizace laserem vytvořených struktur je tavenina, která vzniká v průběhu opracování a rozlévá se ven ze zářezu a nejsou zcela jasné její vlastnosti a její vliv na vlastnosti solárního článku. Detail takové taveniny je ukázán na obr. 5.19. Cílem této kapitoly bylo provést studium rezistivity u taveniny, která



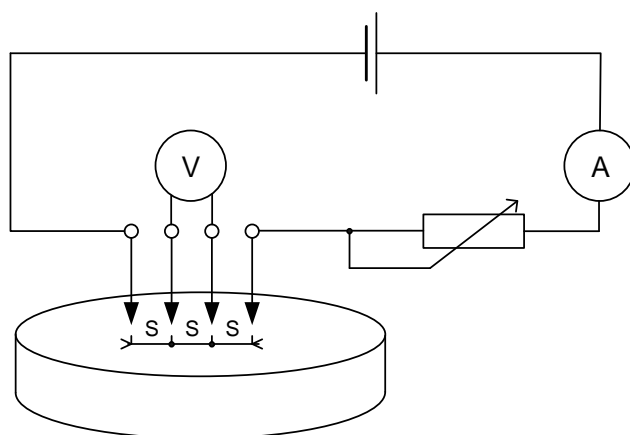
Obr. 5.19: Detail laserového zářezu, vzorek D283, pohled shora (vlevo), profil zářezu (vpravo).

vzniká při laserovém opracování křemíkových solárních článků. U této taveniny není znám přesný vliv na parametry a vlastnosti solárního článku a studium rezistivity tohoto materiálu se jeví jako užitečné pro určení, jaký vliv tato tavenina má.

Pro měření rezistivity byla zvolena čtyřbodová metoda. Základem měření je kontaktovací stanice Cascade s uspořádáním hrotových kontaktů v přímce, přičemž dva krajní jsou proudové, vnitřní dva jsou napěťové. Vzdálenost mezi kontakty byla použita stejná, aby výpočet byl jednodušší. Její velikost je nastavena na 0,5 mm. Rezistivita je pak počítána z následujícího vztahu vycházejícího z [62]

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{U}{I} dF \frac{d}{s}, \quad (5.1)$$

kde U je napětí mezi vnitřními kontakty, I je proud procházející obvodem, h je tloušťka vzorku a $F(d/s)$ je korekční faktor. Schéma použité metody je zobrazeno na obrázku 5.20. Stěžejními přístroji pro měření rezistivity byly kontaktovací stanice Cascade MT150 a analyzátor polovodičových součástek Keithley 4200-SCS. Spojení těchto dvou přístrojů umožňuje získání velmi precizních výsledků.



Obr. 5.20: Schéma čtyřbodové metody měření rezistivity.

Pro měření byla vytvořena sada testovacích vzorků s následujícími parametry. Velikost všech vzorků byla 3×3 cm. Z toho čtyři vzorky byly připraveny ze substrátu ptyp s difúzí, kde jeden vzorek byl laserově opracován s nastavením laseru výkon 100 %, rychlost 100 mm/s, opakovací frekvence 25 kHz. Druhý vzorek je opracován laserem se stejnými parametry, ale je ze spodní strany odleptaný. Další dva kusy jsou pak opět ze substrátu ptyp s difúzí, ale bez dalšího opracování. Poslední čtyři vzorky jsou pak připraveny ze substrátu ptyp bez difúze, kde jeden je opět opracován laserem s parametry výkon 100 %, rychlost 100 mm/s a opakovací frekvence 25 kHz. Druhý je pak opět opracován laserem se stejnými parametry a ze spodní strany odleptaný a poslední dva jsou bez dalších úprav. Naměřené a vypočítané experimentální výsledky jsou shrnuty v tabulkách 5.13 až 5.21.

Tab. 5.13: Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek bez difúze opracovaný laserem v různých bodech.

Vzorek bez difúze opracovaný laserem						
	rezistivita [Ωcm]					
měření č.:	bod A	bod B	bod C	bod D	bod E	bod F
1	1,976	1,356	1,676	1,218	1,070	1,878
2	1,917	1,397	1,677	1,328	1,078	1,697
3	1,927	1,396	1,679	1,313	1,105	1,660
4	1,388	1,388	1,683	1,283	1,109	1,639
5	1,485	1,402	1,643	1,287	1,109	1,629
6	1,511	1,379	1,619	1,274	1,103	1,615
7	1,518	1,375	1,573	1,263	1,107	1,599
8	1,531	1,356	1,576	1,266	1,103	1,586
9	1,516	1,363	1,575	1,257	1,098	1,561
10	1,526	1,374	1,586	1,243	1,083	1,556

Tab. 5.14: Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek s difúzí opracovaný laserem v různých bodech.

Vzorek s difúzí opracovaný laserem						
	rezistivita [Ωcm]					
měření č.:	bod A	bod B	bod C	bod D	bod E	bod F
1	0,827	0,776	0,906	0,393	0,397	0,635
2	0,755	0,768	0,883	0,390	0,383	0,687
3	0,831	0,928	0,872	0,390	0,373	0,649
4	0,876	0,928	0,852	0,399	0,391	0,635
5	0,911	0,929	0,892	0,384	0,379	0,674
6	0,939	0,935	0,891	0,402	0,382	0,678
7	0,842	0,926	0,863	0,382	0,382	0,686
8	0,883	0,992	0,895	0,396	0,369	0,689
9	0,787	1,009	0,897	0,403	0,371	0,691
10	0,862	1,109	0,893	0,403	0,370	0,679

Tab. 5.15: Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek bez difúze bez opracování laserem v různých bodech.

Vzorek bez difúze bez laserového opracování I.					
	rezistivita [Ωcm]				
měření č.:	bod A	bod B	bod C	bod D	bod E
1	1,742	2,734	2,340	1,668	1,039
2	1,754	2,643	2,064	1,631	0,989
3	1,850	2,601	2,111	1,609	0,966
4	1,777	2,609	2,171	1,665	1,008
5	1,758	2,618	2,037	1,651	0,936
6	1,757	2,628	1,932	1,642	1,085
7	1,815	2,628	1,937	1,601	1,115
8	1,873	2,625	1,834	1,538	1,052
9	1,806	2,596	1,905	1,512	1,089
10	1,662	2,599	1,648	1,462	0,921

Tab. 5.16: Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek s difúzí bez opracování laserem v různých bodech.

Vzorek s difúzí bez laserového opracování I.			
	rezistivita [Ωcm]		
měření č.:	bod A	bod B	bod C
1	0,0062	0,0068	0,0065
2	0,0062	0,0068	0,0065
3	0,0062	0,0068	0,0065
4	0,0062	0,0068	0,0065
5	0,0062	0,0068	0,0065
6	0,0062	0,0068	0,0065
7	0,0062	0,0068	0,0065
8	0,0062	0,0068	0,0065
9	0,0062	0,0068	0,0065
10	0,0062	0,0068	0,0065

Tab. 5.17: Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek s difúzí bez opracování laserem v různých bodech.

Vzorek s difúzí bez laserového opracování II.						
	rezistivita [Ωcm]					
měření č.:	bod A	bod B	bod C	bod D	bod E	bod F
1	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
2	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
3	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
4	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
5	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
6	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
7	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
8	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
9	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067
10	0,0072	0,0068	0,0069	0,0067	0,0063	0,0067

Tab. 5.18: Naměřené hodnoty rezistivity pro vzorek bez difúze bez opracování laserem v různých bodech.

Vzorek bez difúze bez laserového opracování II.						
	rezistivita [Ωcm]					
měření č.:	bod A	bod B	bod C	bod D	bod E	bod F
1	1,660	3,097	2,563	3,431	3,469	2,838
2	1,832	3,036	2,124	3,455	3,356	2,787
3	2,082	3,025	2,116	3,515	3,405	2,884
4	1,845	3,068	1,839	3,509	3,399	2,868
5	1,858	3,115	1,984	3,382	3,373	2,908
6	1,732	3,109	1,888	3,469	3,466	2,941
7	1,862	3,063	1,739	3,486	3,466	2,832
8	1,971	3,062	1,806	3,486	3,466	2,832
9	1,711	3,062	1,706	3,486	3,466	2,832
10	1,736	3,062	1,640	3,486	3,466	2,832

Tab. 5.19: Naměřené hodnoty rezistivity v různých bodech pro vzorek s difúzí odleptaný ze spodní strany.

Odleptaný vzorek s difúzí					
	rezistivita [Ωcm]				
měření č.:	bod A	bod B	bod C	bod D	bod E
1	0,982	1,295	0,662	1,062	1,185
2	0,973	1,162	0,635	0,925	1,145
3	1,023	1,173	0,614	0,962	1,168
4	0,979	1,118	0,597	0,911	1,070
5	1,043	1,119	0,574	0,766	1,084
6	0,984	1,119	0,562	0,767	1,062
7	0,972	1,131	0,545	0,824	1,049
8	0,956	1,147	0,544	0,740	1,026
9	0,945	1,144	0,545	0,733	1,027
10	0,969	1,158	0,516	0,799	1,049

Tab. 5.20: Naměřené hodnoty rezistivity v různých bodech pro vzorek bez difúze odleptaný ze spodní strany.

Odleptaný vzorek bez difúze						
	rezistivita [Ωcm]					
měření č.:	bod A	bod B	bod C	bod D	bod E	bod F
1	1,421	1,416	1,346	1,759	1,564	2,116
2	1,391	1,201	1,062	1,574	1,595	1,935
3	1,300	1,139	1,036	1,520	1,549	1,812
4	1,322	1,127	1,025	1,504	1,574	1,779
5	1,302	1,068	1,013	1,515	1,591	1,682
6	1,316	1,084	1,004	1,505	1,607	1,651
7	1,323	1,148	1,017	1,496	1,609	1,645
8	1,316	1,138	1,009	1,519	1,618	1,692
9	1,311	1,117	1,018	1,515	1,601	1,669
10	1,344	1,137	0,997	1,540	1,611	1,610

Tab. 5.21: Průměrné hodnoty rezistivity pro jednotlivé vzorky.

Vzorek	rezistivita [Ωcm]
ptyp substrát s difúzí opracovaný laserem	0,685
ptyp substrát bez difúze opracovaný laserem	1,307
ptyp substrát s difúzí bez opracování laserem II.	0,0065
ptyp substrát s difúzí bez opracování laserem I.	0,0068
ptyp substrát bez difúze bez opracování laserem II.	1,527
ptyp substrát bez difúze bez opracování laserem I.	2,767
ptyp substrát s difúzí opracovaný laserem (sleptané)	0,932
ptyp substrát bez difúze opracovaný laserem (sleptané)	1,407

Závěrem této kapitoly můžeme tedy shrnout, že byla měřena rezistivita různě připravených vzorků s provedenou difúzí i bez ní. Cílem bylo stanovení vlastností taveniny vzniklé při laserovém opracování a případný vliv dopantů na celkovou vodivost. Přetvořené povrchové vrstvy vytvářejí patrně amorfni polovodivou strukturu s obtížně definovatelnými vlastnostmi. Jako technika měření byla zvolena čtyřbodová metoda s konstantní roztečí hrotů situovaných na přímce. Bylo zjištěno, že ovlivnění výsledků vnějšími vlivy je zásadní, a proto bylo měření vždy prováděno opakovaně i v různých polohách na ploše vzorku. Data jsou následně zpracována statisticky. Přibližování jednotlivých kontaktů bylo prováděno manipulátory v kontaktovací stanici Cascade MT150 a musí být prováděno s maximální precizností. Nutno podotknout, že získané výsledky jsou do značné míry limitovány neznámou tloušťkou laserem přetvořených vrstev a nebylo proto možné dokončit některé výpočty. Souhrn získaných výsledků je uveden v tab. 5.21, ze které lze vyvodit významný nárůst rezistivity amorfni taveniny především u vzorků s difúzí. Tento trend odpovídal očekávání.

6 METODIKA PRO CHARAKTERIZACI LASEREM VYTVOŘENÝCH STRUKTUR

Na základě komplexního studia struktury a parametrů křemíkových solárních článků jehož dílčí výsledky byly prezentovány výše vznikla celá řada definovaných metodických postupů, které umožňují vyhodnocení změn krystalických křemíkových článků v důsledku jejich opracování laserem. Vybrané přístupy jsou popsány v této kapitole. Zde je vhodné uvést, že níže zmíněné stanovené postupy z mého výzkumu vedly ke vzniku komplexní metodiky, která byla obhájena v rámci projektu FR-TI1/305 „Applikace laserových technologií do procesu výroby krystalických křemíkových solárních článků“.

6.1 Podstata použitého přístupu

Na základě výše uvedených výsledků a celé řady dalších měření bylo pozorováno, že laserové zářezy, které jsou realizovány tak, že protínají PN přechod až do substrátu, se projevují ve VA charakteristikách posunem směrem k vyšším proudům. Tento jev nasvědčuje vzniku kanálů protínajících celý PN přechod až do substrátu a na vedení proudu se zde podílí jak objem přetvořené oblasti, tak vzniklé povrchové stavy. Zároveň však na VA charakteristikách nejsou pozorovány žádné nově vzniklé oblasti prudkých změn proudů, které by nasvědčovaly vzniklým průrazům v oblasti laserového zářezu. Měření lokálního vyzařování ve viditelném i infračerveném spektru také neukazují na vznik nových lokálních defektů v PN přechodu. Můžeme tedy tvrdit, že laserové zářezy, které protínají PN přechod až do substrátu, vykazují homogenní chování a mají především ohmický charakter. Jejich voltampérové charakteristiky jsou lineární a symetrické a zjednodušeně bychom je mohli modelovat jako paralelně připojený rezistor k PN přechodu. Můžeme tedy konstatovat, že vytvoření laserových zářezů se projeví jako pokles ekvivalentního paralelního odporu. Je tedy zřejmé, že tyto vytvořené struktury budou u článků způsobovat změny elektrických parametrů solárních článků, ale zároveň mohou způsobit i pokles jejich konverzní účinnosti.

Při posuzování vlivu laserových zářezů na změny parametrů solárního článku je nutné sledovat především následující dvě hlediska. Prvním hlediskem je pozitivní vliv na výsledný solární článek. Tím je především elektrická izolace defektní oblasti od oblasti nedefektní (např. izolace nedokonale vytvořených hran). Je zde tedy žádoucí, aby bylo dosaženo co nejlepší izolace oddělených částí, a tedy pokud možno co nejvyššího elektrického odporu. Druhým hlediskem je negativní dopad vytvořené struktury na solární článek. Tím může být pokles paralelního odporu v důsledku vzniku ohmického kanálu v PN přechodu, který je vytvořen laserovou strukturou.

6.2 Příprava vzorků

Pro charakterizaci laserových struktur bylo nutné stanovit vhodný postup pro přípravu vzorků. Ideální stav, který byl odvozen z řady experimentů, shrnuje tato sekce.

V první řadě je nutné vzorky solárních článků zbavit busbarů (tj. společných kontaktů) tak, aby nebyly vodivě spojeny horní kontakty solárního článku. To můžeme provést odstraněním horní části solárního článku s busbarem, ideální metodou se zde ukázalo naříznutí laserem a následné dolomení.

V dalším kroku je realizován laserový zářez. Ten musí být veden v oblasti mezi dvěma kontakty po celé délce článku, rovnoběžně s nimi. Zde je potřeba věnovat pozornost faktu, aby na okrajích rýhy nezůstala nepřetvořená oblast, to znamená, že laserový svazek musí projít přes hranu článku. Nicméně zde vyvstává problém s taveninou, která vzniká při laserovém opracování. Tato tavenina degraduje hrany v okolí okraje rýhy. Tento problém je vyřešen odstraněním této části solárního článku na kterých se vyskytují konce zářezů. Typicky se jedná o odstranění pásku o šířce několika milimetrů až jednoho centimetru. Zde je opět vhodné použít metodu naříznutí článku laserem ze spodní strany a následné dolomení.

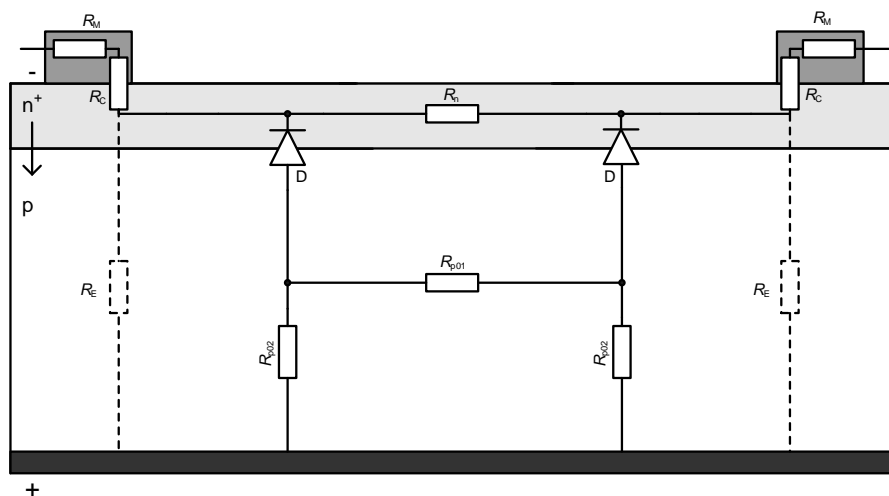
6.3 Stanovení náhradních modelů pro určení velikosti odporu oblasti laserového zářezu

Měření odporu mezi kontakty solárního článku se ukazuje jako velmi vhodná metoda pro vyhodnocení elektrických parametrů izolačních struktur vytvořených laserem. Odpor je měřen čtyřbodově v oblasti mezi dvěma nespojenými sousedními kontakty na vrchní straně solárního článku. Schéma zapojení pro toto měření bylo uvedeno v kapitole 4.1.3. Pro interpretaci výsledků z měření bylo nutno stanovit schematické modely pro oblasti mezi dvěma sousedními horními kontakty článku. Schématické znázornění pro oblast bez realizovaného laserového zářezu je na obr. 6.1. Odpovídající náhradní model tohoto uspořádání je znázorněn na obr. 6.2. Vycházíme z předpokladu, že povrch článku je dokonale pasivován, odpor vlastního kontaktu reprezentuje rezistor R_M , odpor styku kov-polovodič je R_C , odpor polovodiče N je R_n , PN přechod solárního článku je znázorněn diodami D. Svodový proud, který teče přes hrany solárního článku je charakterizován rezistorem R_E . Je zřejmé, že oblast N má velmi dobrou vodivost a díky tomu můžeme zanedbat proudy tekoucí přes hrany a přes PN přechod do substrátu. Proto můžeme psát, že elektrický odpor v oblasti mezi dvěma kontakty na vrchní straně bude

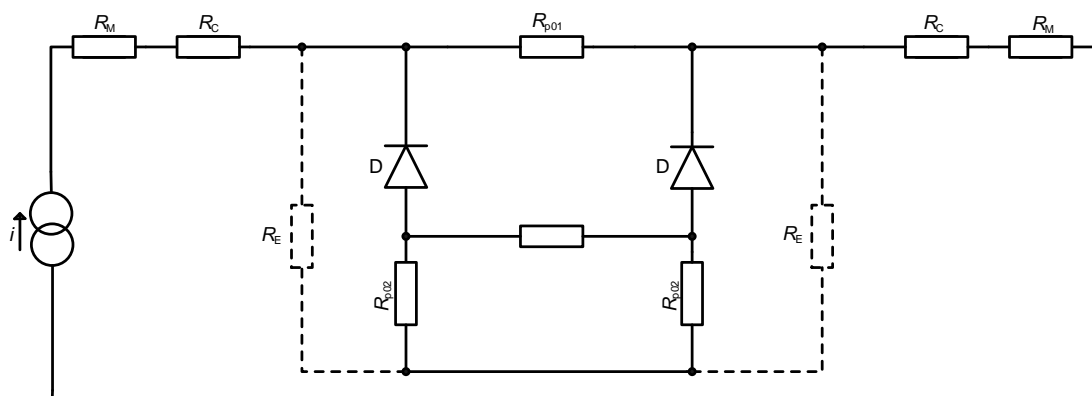
$$R_0 = 2R_M + 2R_C + R_n. \quad (6.1)$$

Splnění výše uvedených tvrzení bylo ověřeno experimentálně a odpor R_0 pak dosahuje typicky hodnoty v řádu jednotek ohmů.

Nyní se podívejme na situaci, kdy bude v oblasti mezi sousedními kontakty článku vytvořena laserová struktura ve formě rýhy, u které budeme předpokládat, že zasahuje přes PN přechod až do substrátu a tvoří kanál s ohmickým charakterem. Schéma takové oblasti je znázorněno na obr. 6.3 a odpovídající náhradní schéma na obr. 6.4. Zde bylo nutné přidat rezistor o odporu R_{CH} , který znázorňuje část laserem vytvořeného kanálu umístěnou paralelně k přechodu a rezistor o odporu



Obr. 6.1: Schéma oblasti mezi dvěma sousedními horními kontakty článku bez laserového opracování s vyznačením prvků náhradního schématu.

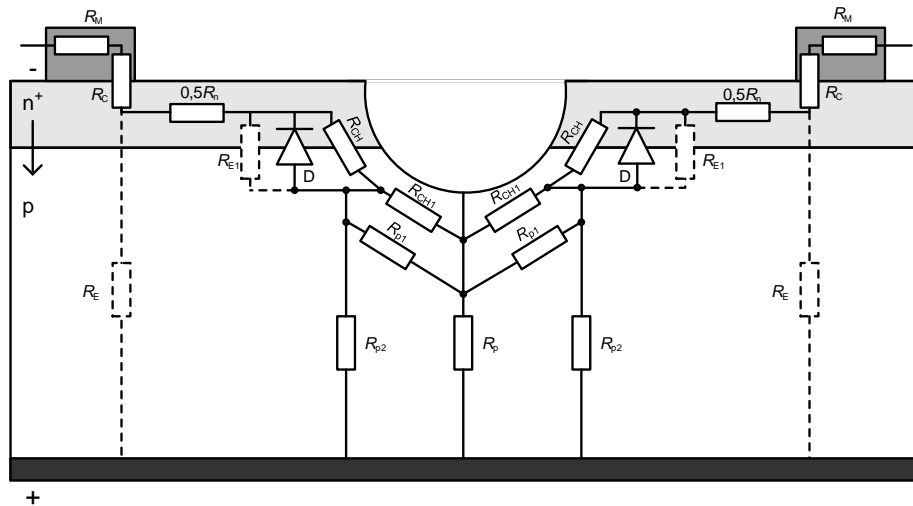


Obr. 6.2: Náhradní schéma oblasti článku bez opracování laserem mezi dvěma sousedními horními kontakty.

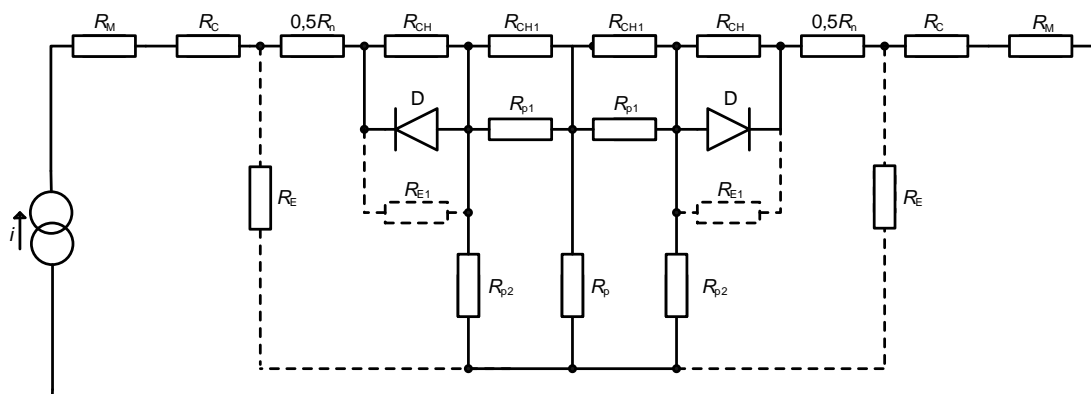
R_{CH1} , popisující část laserem vytvořeného kanálu umístěnou paralelně k substrátu. Dále zde přibyl rezistor o odporu R_{p1} charakterizující ekvivalentní část substrátu. Ten vede proud paralelně s proudem tekoucím rezistorem o odporu R_{CH1} . Navíc jsou zde rezistory o odporech R_p , resp. R_{p2} , které charakterizují odpor polovodiče P mezi spodní stranou P PN přechodu a elektrodou na spodní straně článku. Proud, který teče přes hrany v oblasti rýhy, je reprezentován rezistorem o odporu R_{E1} .

Uvedený náhradní obvod se může zdát na první pohled složitý a podstatně méně přehledný než je tomu u článku bez laserového zářezu. Nicméně podle následujících úvah, které vznikly na základě vzájemného porovnání jednotlivých měřených a vyhodnocených veličin reálných solárních článků, se situace zjednoduší. Z měření plyne, že VA charakteristika mezi sousedními kontakty, mezi které je umístěn laserový zářez, je symetrická a v hodnotách napětí do 0,1 V lineární. Typicky se hodnota odporu R mezi těmito sousedními kontakty pohybuje v řádu jednotek k Ω . Určené hodnoty odporů R_p , R_{p1} , R_{p2} se pohybují v řádu jednotek ohmů.

Vzhledem k výše zmíněným měřením odporu mezi sousedními kontakty solárního článku bez laserového zářezu, kdy se velikost naměřené hodnoty odporu R_0 pohybuje v řádu jednotek ohmů, je tedy zřejmé, že hodnoty R_M , R_C a R_n nemají při určování odporu R , vzhledem k jeho typické velikosti v jednotkách k Ω , vliv. Podobně je na tom i paralelní kombinace R_{CH1} a R_{p1} , kterou opět můžeme, vzhledem k velikosti R_{p1} v řádu jednotek ohmu, zanedbat. Na základě měření VA charakteristik jakostních solárních článků malých rozměrů v závěrném stavu bylo zjištěno, že pro hodnoty



Obr. 6.3: Schéma oblasti mezi dvěma sousedními horními kontakty laserově opracovaného článku s vyznačením prvků náhradního schématu.



Obr. 6.4: Náhradní schéma oblasti mezi dvěma sousedními horními kontakty laserově opracovaného článku.

závěrného napětí do 0,1 V je odpor celého solárního článku vždy větší než 100 k Ω . Pokud předpokládáme, že je v tomto rozmezí napětí možné popsat svodové proudy tekoucí přes hrany rezistory R_E a R_{E1} (tj. předpokládáme ohmický charakter hran), musí být každý z těchto odporů větší než 100 k Ω . Vzhledem k hodnotám měřeného odporu R v jednotkách k Ω pak můžeme vliv hran zanedbat.

Na základě výše uvedených úvah můžeme tvrdit, že stěžejní roli pro určení hodnoty odporu R budou mít dvě paralelní kombinace rezistoru o odporu R_{CH} , a diody D , které jsou spolu spojeny v sérii. Proud, který teče mezi dvěma sousedními kontakty pak prochází jednou paralelní kombinací s diodou v závěrném stavu a druhou s diodou v propustném stavu. Diodu v závěrném stavu můžeme vzhledem k velikosti jejího odporu vůči odporu R_{CH} v paralelní kombinaci zanedbat. Jiná situace je ovšem s diodou v propustném stavu. Tam musíme zaručit tak nízkou hodnotu napětí, aby nedošlo ještě k jejímu otevření. Z měření VA charakteristik solárních článků v propustném stavu bylo zjištěno, že odpor solárního článku v oblasti napětí do 0,05 V je podstatně větší než 100 k Ω . Pokud tedy budeme provádět měření pro napětí do dvojnásobku této mezní hodnoty, tj. do 0,1 V, je možné diodu zanedbat i v případě propustného stavu.

6.4 Stanovení veličin pro hodnocení kvality laserového opracování

Na základě předchozích úvah, které jsou podpořeny experimentálně zjištěnými výsledky, můžeme tedy pro elektrický odpor laserového zářezu vytvořeného mezi dvěma sousedními kontakty, při splnění podmínky pro velikost napětí mezi kontakty maximálně 0,1 V, psát

$$R \approx 2R_{\text{CH}}. \quad (6.2)$$

Maximální hodnota napětí 0,1 V je stanovena se značnou rezervou, běžně je možné použít až několikanásobek této hodnoty.

Pro ohodnocení kvality laserového opracování, na základě uvažování všech zmíněných aspektů, je tedy možné definovat dvě veličiny.

1. Veličina A kvantitativně hodnotí kvalitu elektrické izolace dvou částí solárního článku

$$A = 2R_{\text{CH}}L = RL, \quad (6.3)$$

kde L je délka laserem vytvořené rýhy. Tato veličina charakterizuje elektrický odpor mezi dvěma oblastmi, které jsou odděleny laserovým zářezem s jednotkovou délkou, jednotkou je Ωm . Konstanta 2 je ve vztahu 6.3 z důvodu, že odpor R_{CH} určuje pouze polovinu vlivu laserem vytvořeného zářezu na celkový elektrický odpor mezi izolovanými oblastmi, viz schéma 6.4. Pokud je na stejném typu solárního článku provedena izolace dvou oblastí se stejnými parametry laserového opracování pomocí laserové struktury (zářezu) o délce l , bude výsledný odpor mezi oběma oblastmi

$$R_s = \frac{A}{l}. \quad (6.4)$$

2. Veličina B kvantitativně ohodnocuje přídatný paralelní odpor připojený k PN přechodu, který způsobuje degradaci stávajících parametrů solárního článku. V tom případě je opět možné provést určitá zanedbání některých prvků náhradního schématu podle obr. 6.4. Tento paralelní odpor je pak určen paralelní kombinací dvou odporů R_{CH} . Pro veličinu B platí

$$B = \frac{1}{2}R_{\text{CH}}L = \frac{1}{4}RL, \quad (6.5)$$

kde konstanta $1/2$ odpovídá skutečnosti, že se jedná o paralelní kombinaci odporů R_{CH} . Tato veličina má význam přídatného paralelního odporu k stávajícímu PN přechodu solárního článku v důsledku laserově vytvořené struktury při její jednotkové délce. Jednotkou je opět Ωm .

Vztah 6.5 platí pro situaci, kdy nedojde k úplnému mechanickému oddělení obou oblastí solárního článku. V opačném případě by se na dané oddělené části projevil pouze jeden odpor R_{CH} a hodnota veličiny B (označíme ji jako B') by byla dvojnásobná,

$$B' = R_{CH}L = \frac{1}{2}RL. \quad (6.6)$$

Pokud je opět na stejném typu solárního článku provedena izolace dvou oblastí se stejnými parametry laserového opracování pomocí laserové struktury (zářezy) o délce l , bude výsledný přídatný paralelní odpor

$$R_p = \frac{B}{l}. \quad (6.7)$$

Porovnáním vztahů 6.3 a 6.5 je zřejmé, že jsou veličiny A a B závislé a platí

$$A = 4B, \text{ resp. } A = 2B'. \quad (6.8)$$

Při optimalizaci laserových procesů je tedy snahou nalézt takové parametry laserového opracování, aby hodnoty veličin A a B byly maximální. Ze vztahu 6.8 je pak zřejmé, že nárůst hodnoty jedné veličiny způsobí nárůst hodnoty veličiny druhé, obě podmínky jsou tedy ve vzájemném souladu.

6.5 Vyhodnocení kvality laserového zářezu

Výstupem již zmíněného měření odporu mezi kontakty není jenom vlastní odpor laserového zářezu, ale i VA charakteristika zkoumané oblasti. Vzhledem k tomu, že často neznáme přibližné parametry měřeného vzorku solárního článku, je vhodné nejprve vyhodnotit zda je naměřená VA charakteristika lineární a symetrická. Běžně se mohou objevit nesymetrie kolem nulového napětí, nelinearity nebo případně skoky v charakteristice. Tyto skutečnosti můžou indikovat např. nedostatečnou hloubku laserového zářezu, zachované zbytky PN přechodu nebo mohou naznačovat nedodržení podmínky malého napětí tak, aby nedošlo v propustném stavu k otevření PN přechodu.

V případě, že bude VA charakteristika splňovat očekávání, můžeme vyhodnotit kvantitativní parametry, tzn. veličiny A a B , podle vztahů 6.3 a 6.5. Je zřejmé, že vyšší hodnoty budou značit lepší kvalitu laserových zářezů. Závěrem tedy lze tvrdit, že na základě vyhodnocení těchto stanovených parametrů můžeme posoudit kvalitu zářezů realizovaných na stejném typu křemíkových solárních článků nebo naopak můžeme hledat ideální nastavení parametrů pro realizaci laserového procesu.

7 VYUŽITÍ TECHNOLOGIE FIB PRO PASIVACI DEFEKTNÍCH OBLASTÍ

Tato kapitola pojednává o využití technologie fokusovaného svazku iontů (FIB) v oblasti křemíkových solárních článků. Jedná se konkrétně o ideu, kdy je u vzorku solárního článku nalezen defekt pomocí CCD kamery a je tedy přibližně známa jeho poloha. Díky tomu lze pomocí mikroskopu SNOM tento defekt přesněji lokalizovat a poté ho díky tomu nalézt mikroskopem SEM. Následně je pak defektní oblast izolována nebo úplně odprášena pomocí FIB. Negativní vlivy defektu by pak měly být touto cestou potlačeny. Následující text shrnuje výsledky studia této oblasti.

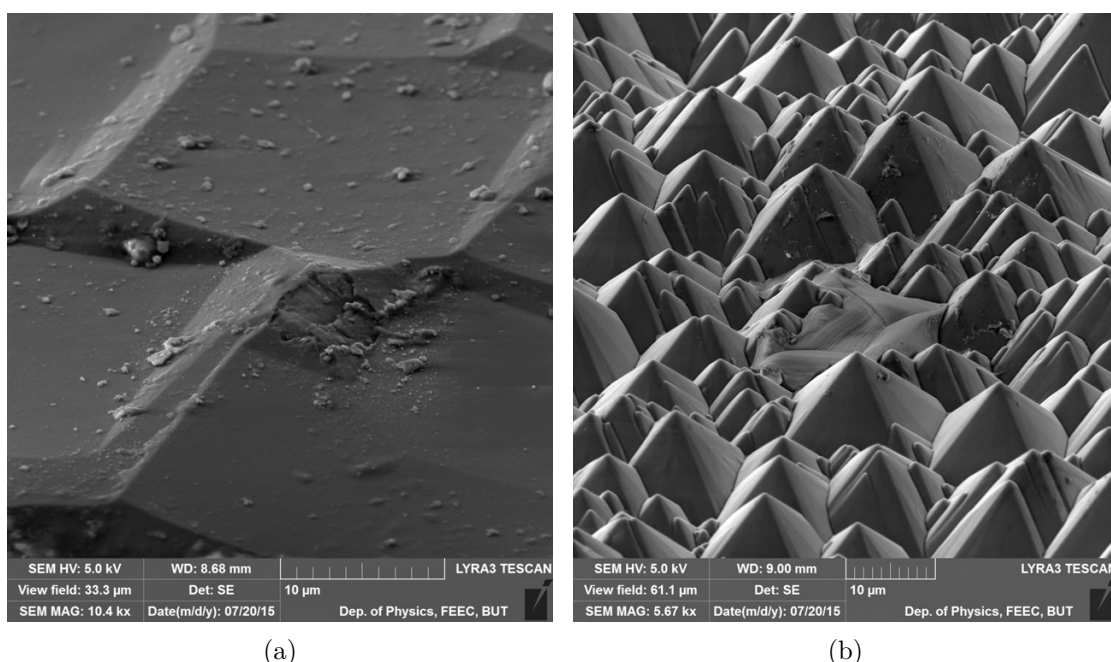
7.1 Příprava vzorků a použité experimentální metody

Pro výzkum byla vytvořena speciální sada vzorků. Solární články se standardní velikostí byly rozřezány na vzorky o velikosti 1×1 cm. Tento přístup byl použit především díky nemožnosti měřit skenovacím elektronovým mikroskopem celý solární článek a dále pak na menších vzorcích se dá lépe demonstrovat vliv lokálního defektu na takový vzorek. Další specialitou byly vzorky, u kterých nebyla vytvořena pyramidální struktura alkalickým leptáním, to umožnilo v topografii snáze najít přesnou polohu defektní oblasti.

Všechny vzorky byly podrobeny měření vyzařování při buzení závěrným proudem (vyzařování ve viditelném spektru – CCD kamera, vyzařování v infračerveném spektru – termokamera). Dále pak u nich byla změřena voltampérová charakteristika v temném prostředí v závěrném režimu a voltampérová charakteristika při osvětlení. Po přibližné lokalizaci defektu pomocí CCD kamery byla tato defektní oblast podrobena analýze topografie na mikroskopu SNOM a díky technice publikované v [61] byla nalezena pozice defektu s přesností v řádu desítek mikrometrů. Takto lokalizovaný defekt již bylo možné nalézt mikroskopem SEM a tento defekt byl poté izolován nebo celý odprášen pomocí FIB. Takto upravený vzorek byl opět podroben analýze.

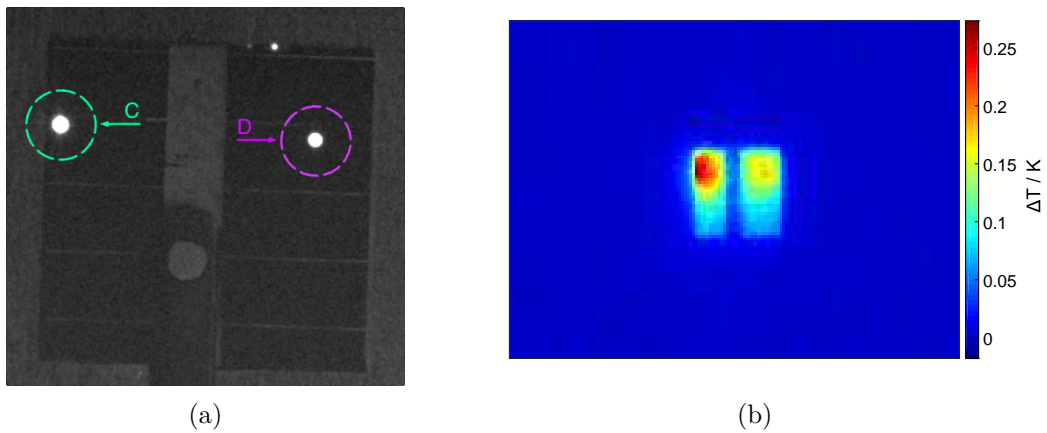
7.2 Vybrané dosažené výsledky

Pro demonstrování dosažených výsledků v oblasti odprašování defektů pomocí FIB jsem zvolil měření na vzorcích sxx4, vf1a a vf2a. Nejprve se podíváme na výsledky dosažené u vzorku vf2a. Jedná se o vzorek, u kterého nebyla vytvořena pyramidální struktura alkalickým leptáním, taková struktura má tzv. „stolový“ charakter, viz obr. 7.1a. U této struktury bylo mnohem jednodušší přesně nalézt defektní oblast, protože u pyramidální struktury bývá obraz topografie z mikroskopu SNOM značně zkreslen.



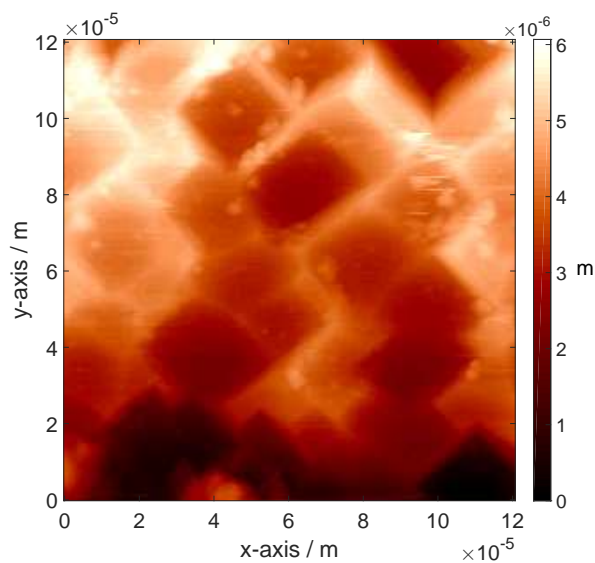
Obr. 7.1: Ukázka topografie povrchu na mikroskopu SEM: struktura při přeskočení alkalického leptání („stolová“) (a), standardní pyramidální struktura (b).

Podívejme se nyní na měření vyzařování ze vzorku vf2a, a to jak ve viditelném, tak v infračerveném spektru. Na obr. 7.2a je ukázáno měření ze CCD kamery, kdy byl vzorek napájen závěrným napětím $U_R = 6\text{ V}$, vzorkem protékal proud $I_R = 1,5\text{ mA}$, teplota vzorku byla 24 °C . Jak můžeme vidět, při této hodnotě napětí můžeme CCD kamerou pozorovat dvě oblasti, které vyzařují ve viditelném spektru. Defektní oblast „C“, jak ukázala další měření, začíná emitovat přibližně od $4,5\text{ V}$ a defektní oblast „D“ při závěrném napětí $5,8\text{ V}$. Obr. 7.2b ukazuje vyzařování v infračerveném spektru při stejných hodnotách napájení. Můžeme zde vidět korelaci mezi CCD a termokamerou, kdy obě defektní oblasti vyzařují jak ve viditelném, tak v infračerveném spektru, nicméně je zřejmé, že v oblasti „C“ vzniká významně větší ohřev, což

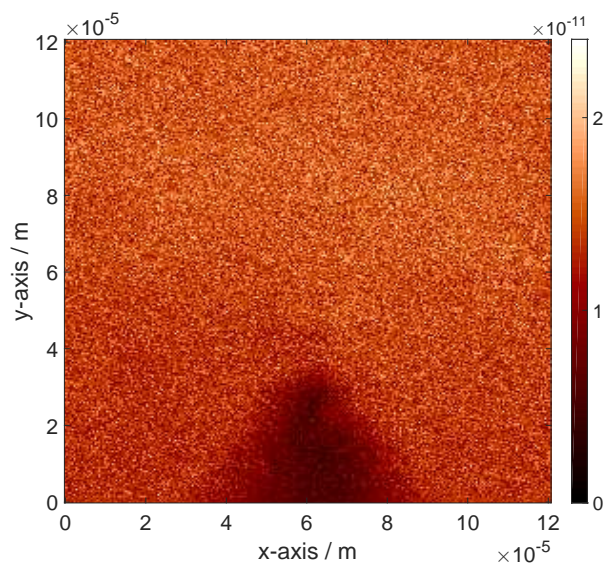


Obr. 7.2: Měření vyzařování ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 6\text{ V}$, $I_R = 1,5\text{ mA}$: Vyzařování ve viditelném spektru (CCD kamera) (a), Vyzařování v infračerveném spektru (termokamera) (b).

nasvědčuje vysoké proudové hustotě v tomto místě vzorku. Pro experiment s odprášením defektní oblasti pomocí FIB byla zvolena na základě její mohutnosti defektní oblast „C“. Vyzařování ve viditelném spektru při napájení závěrným napětí nám určí přibližnou polohu tohoto defektu a umožní nám to nalézt tuto oblast mikroskopem SNOM. Pro nalezení defektní oblasti jsem vycházel z postupu uvedeném v [61] a [60]. Topografii takto nalezené defektní oblasti nám ukazuje obr. 7.3. Na základě tohoto snímku ještě stále nejsme schopni určit přesně polohu defektní oblasti.

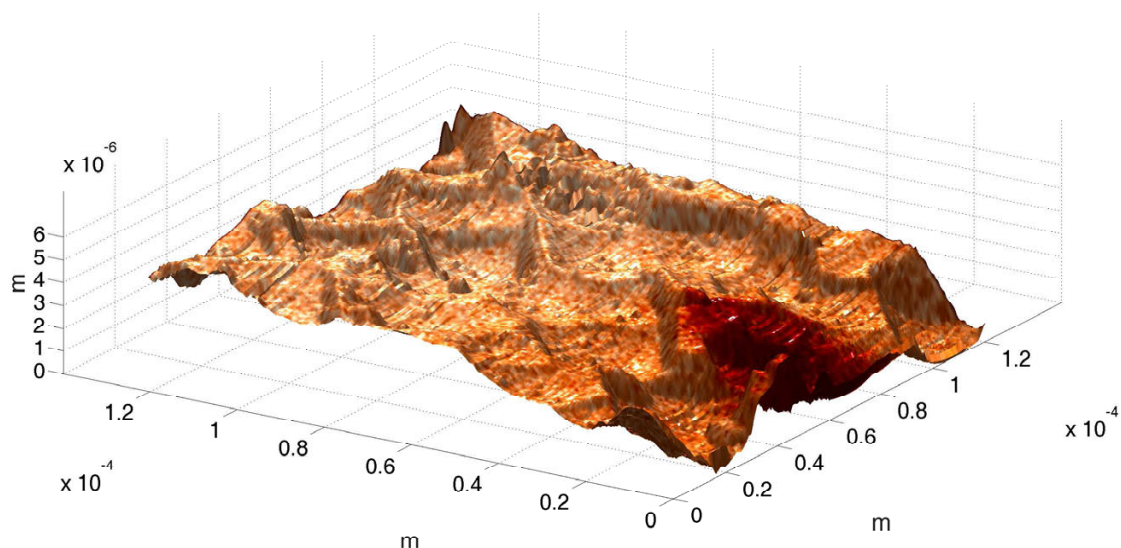


Obr. 7.3: Topografie defektní oblasti vzorku vf2a pořízená mikroskopem SNOM.



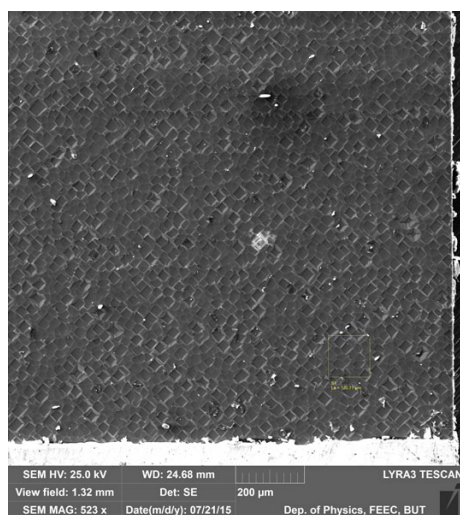
Obr. 7.4: Obráz zaznamenaný fotonásobičem v uspořádání pro reflexní měření - stínový obraz.

Nicméně další obr. 7.4, který znázorňuje rozložení světla ve snímané oblasti, nám v korelaci se snímkem topografie povrchu toto umožní. Špička tmavého kuželu na snímku, který je vytvořen stínem hrotu, znázorňuje pozici defektu. Takto získaný obraz se v literatuře [60] nazývá stínový obraz. Namapováním tohoto obrázku na topografii povrchu defektní oblasti získáme pozici defektní oblasti v řádu jednotek mikrometrů, viz obr. 7.5.



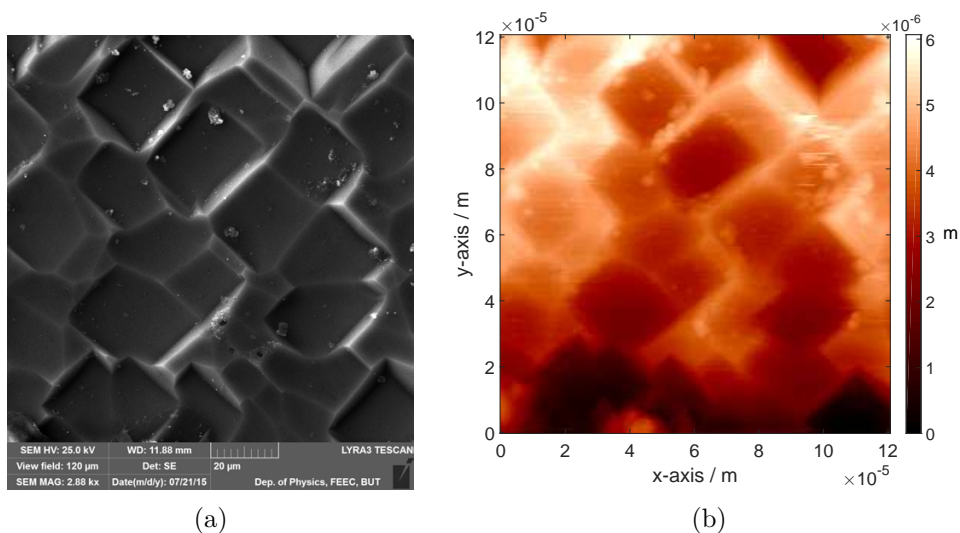
Obr. 7.5: Topografie vzorku solárního článku, vf2a, na topografii vzorku lze vidět namapovaný stín hrotu určený pro lokalizaci vyzářování.

Na základě předchozích měření se nyní můžeme na vzorek podívat na mikroskopu FIB-SEM. Postup je nyní následující – nejprve si pomocí SEM sejmeme přehledový snímek, kde snímáme přibližně jeden čtvereční milimetr vzorku, ve kterém se nachází defektní oblast. Na přehledovém snímku je nyní potřeba na základě snímku topografie z mikroskopu SNOM nalézt shodu a tím i defektní oblast, viz obr. 7.6. Další obr. 7.7 ilustruje shodu mezi topografií změřenou pomocí mikroskopu SNOM

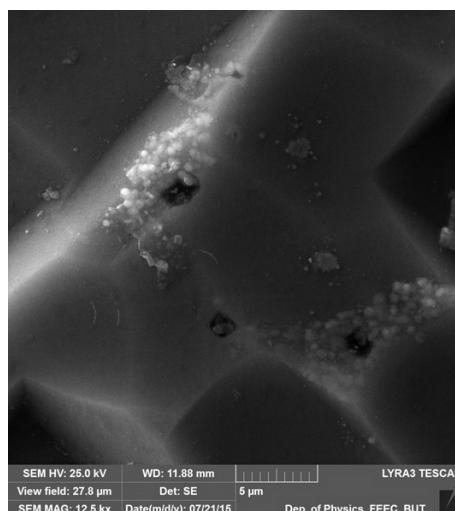


Obr. 7.6: Přehledový snímek pro určení pozice defektní oblasti na vzorku vf2a.

a snímek z mikroskopu SEM. Na snímku z elektronového mikroskopu 7.7a můžeme vidět defektní oblast. Detail této oblasti pak znázorňuje další snímek 7.8.

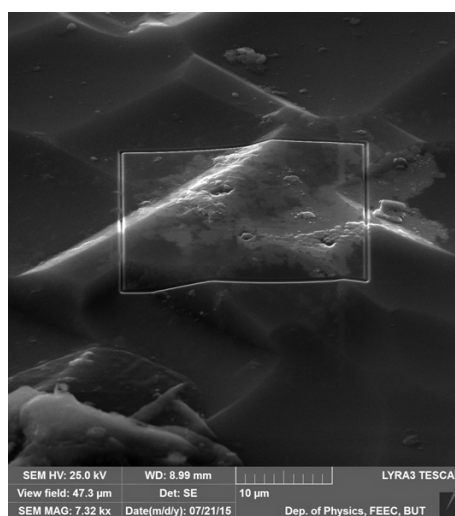


Obr. 7.7: Ukázka shody mezi snímky z mikroskopu SNOM a SEM.



Obr. 7.8: Detail defektní oblasti „C“ na vzorku vf2a, snímek pořízený SEM.

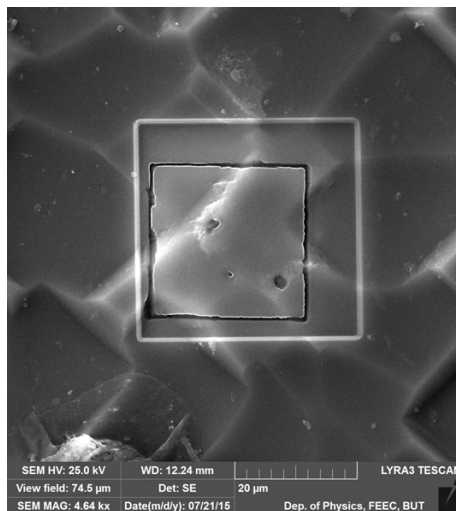
Nyní, když máme defektní oblast přesně lokalizovanou, můžeme přejít k její izolaci pomocí odprášení struktury technologií FIB. Detail struktury vytvořené iontovým odprášením můžeme vidět na obr. 7.9. Při prvním pokusu byl vytvořen izolační



Obr. 7.9: Detail izolace defektní oblasti solárního článku pomocí odprášení iontovým svazkem, velikost stran izolačního zářezu $30 \times 30 \mu\text{m}$ a hloubka $2 \mu\text{m}$.

zářez, který byl tvaru čtverce a jeho rozměry byly $30 \times 30 \mu\text{m}$, hloubka byla $2 \mu\text{m}$ a šířka zářezu $1 \mu\text{m}$. V první fázi struktura tohoto tvaru byla volena z důvodu rychlé realizace. Zářez o této velikosti se odprašoval přibližně 17 sekund, což se jevilo jako vhodné vzhledem k životnosti a ceně zdroje galia u technologie FIB. Nicméně měření ukázala, že takto vytvořený izolační zářez nebyl dostatečný, což mohlo být způsobeno nedostatečnou hloubkou zářezu a navíc se později ukázalo, že těsně mimo izolovaný čtverec se nacházel další defekt, jehož vliv se znásobil pravděpodobně potlačením

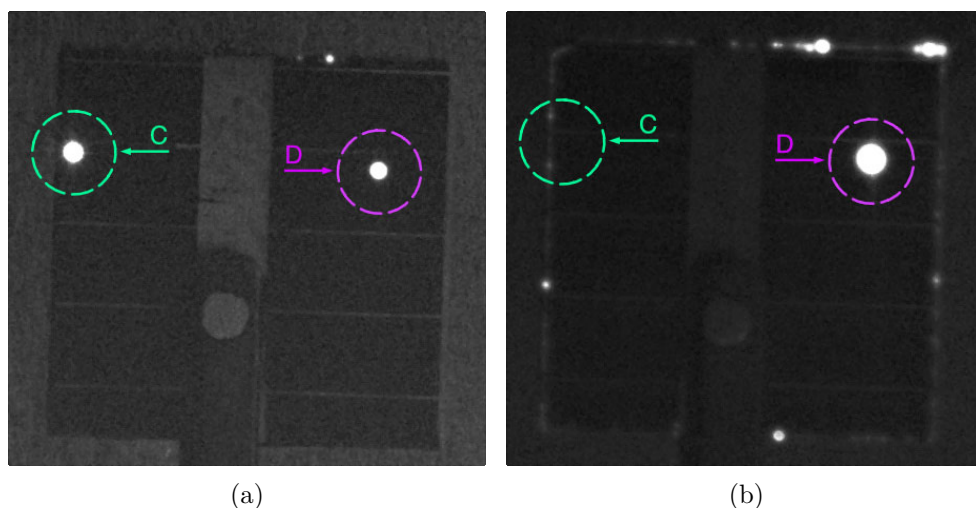
defektů uvnitř izolačního čtverce. Proto jsem se v této fázi rozhodl použít hrubějšího řešení a odprášil jsem celou defektní oblast, tzn. nebyl použit izolační zářez, ale byl odprášen celý čtverec o ploše $40\ \mu\text{m}^2$ a hloubce $2\ \mu\text{m}$, toto můžeme vidět na obr. 7.10. Odprášení takové oblasti trvá přibližně 30 minut, což je pro porovnání času u předchozího zářezu opravdu hodně. Nicméně následující měření dokazují, že takto realizované odprášení defektní oblasti dokáže potlačit její negativní vlivy.



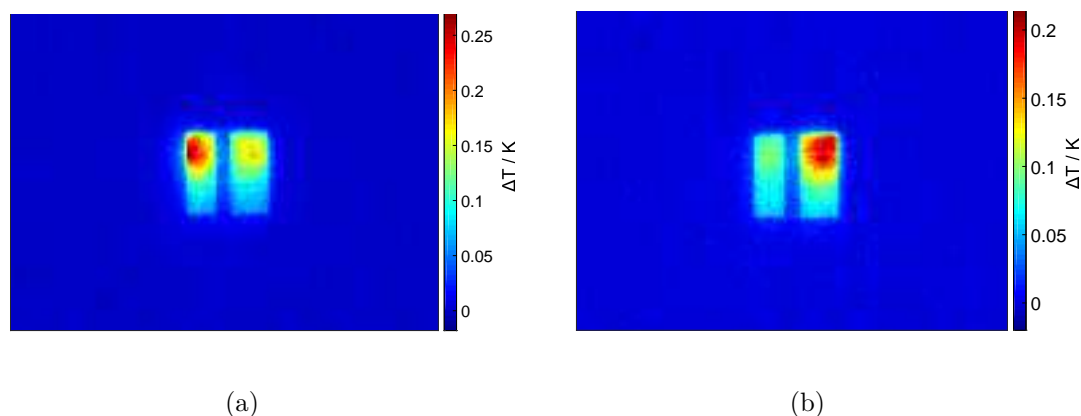
Obr. 7.10: Detail izolace defektní oblasti solárního článku pomocí odprášení iontovým svazkem, plocha izolačního čtverce $40\ \mu\text{m}^2$ a hloubka $2\ \mu\text{m}$.

Nejprve se nyní zaměříme na měření vyzařování ve viditelném spektru CCD kamerou. Na obr. 7.11a můžeme vidět stav měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 6\ \text{V}$, $I_R = 1,5\ \text{mA}$ před odprášením oblasti „C“ iontovým svazkem. Snímek 7.11b pak ukazuje měření za stejných podmínek po odebrání defektní oblasti iontovým odprášením. Z tohoto snímku je zřejmé, že oblast „C“ přestala vyzařovat ve viditelném spektru, což indikuje, že se daná oblast podařilo izolovat a byly potlačeny její nežádoucí vlivy na solární článek. Toto tvrzení dokládá další měření ukázané na obr. 7.12. Zde vidíme měření vyzařování v infračerveném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 6\ \text{V}$: Vzorek před odprášením defektní oblasti „C“ 7.12a, tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „C“ iontovým svazkem 7.12b. Je patrné, že ohřev, který byl v oblasti „C“ před odprášením iontovým svazkem, zmizel a naopak v oblasti „D“ došlo k nárůstu teploty. To je pravděpodobně způsobeno tím, že proudy, které protékaly oblastí „C“, nyní zvyšují proudovou hustotu v oblasti „D“. Stejně tak je tomu i u vyzařování ve viditelném spektru měřeném CCD kamerou.

Měření voltampérové charakteristiky v závěrném směru v temném prostředí před odstraněním defektní oblasti a po odstranění defektní oblasti je na obr. 7.13. Na charakteristice před odstraněním defektu (modrá křivka) můžeme vidět v oblasti $5,5\ \text{V}$



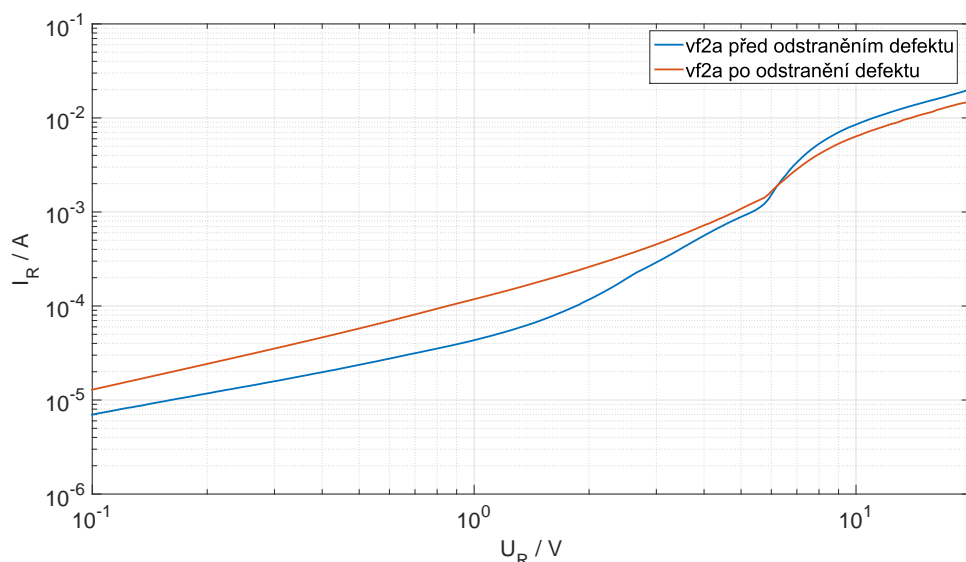
Obr. 7.11: Měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 6$ V: Vzorek před odprášením defektní oblasti „C“ $I_R = 1,5$ mA (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „C“ iontovým svazkem $I_R = 1,3$ mA (b).



Obr. 7.12: Měření vyzařování v infračerveném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 6$ V: Snímek vzorku před odprášením defektní oblasti „C“, $I_R = 1,5$ mA (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „C“ iontovým svazkem $I_R = 1,3$ mA (b).

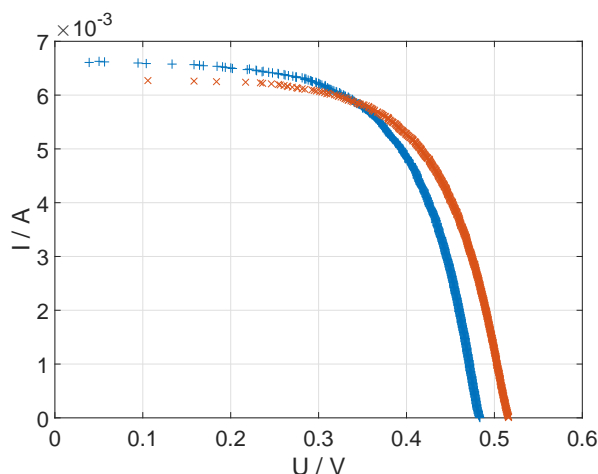
prudký nárůst proudu, který byl pravděpodobně způsoben průrazným mechanismem v defektní oblasti „C“. Tomu nasvědčuje i fakt, že tato oblast přibližně při tomto napětí začala emitovat. Po odstranění defektu se křivka (červená) v oblasti průrazu značně vyhladila. Toto opět nasvědčuje tomu, že izolace defektní oblasti pomocí odprášení svazkem iontů je funkční.

Sérii měření ještě doplňuje voltampérová charakteristika solárního článku při osvětlení. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3, neměl jsem k dispozici průmyslový měřič pro měření VA charakteristiky při osvětlení, a tak jsou zde prezentovaná měření pouze ilustrační a demonstrativní.



Obr. 7.13: Voltampérová charakteristika vzorku vf2a v závěrném směru, měřeno v temném prostředí, $T = 293,15 \text{ K}$.

Z tohoto demonstrativního měření je zřejmé, že zásah iontovým svazkem do struktury solárního článku iontovým svazkem nemá negativní vliv na zatěžovací



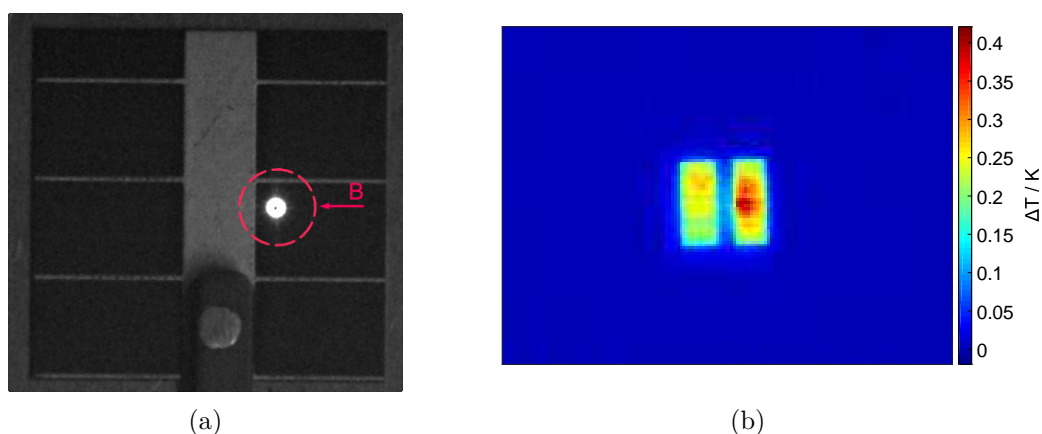
Obr. 7.14: Zatěžovací charakteristika solárního článku při konstantním osvětlení, vzorek vf2a, měření před odstraněním defektní oblasti (modrá křivka), měření po odstraněním defektní oblasti (červená křivka), $T = 298,15 \text{ K}$.

charakteristiku solárního článku při konstantním osvětlení, navíc maximální výkon měřeného vzorku se ještě nepatrně zvětšil. Jak již bylo ale zmíněno, z důvodu absence světla s normalizovaným rozložením energie ve spektru, není tento závěr plně prokazatelný.

Podívejme se nyní na výsledky měření u vzorku vf1a. Jedná se opět o vzorek velikosti 1×1 cm. Povrchová úprava je u tohoto vzorečku standardní, tzn. má pyramidovou strukturu vytvořenou alkalickým leptáním.

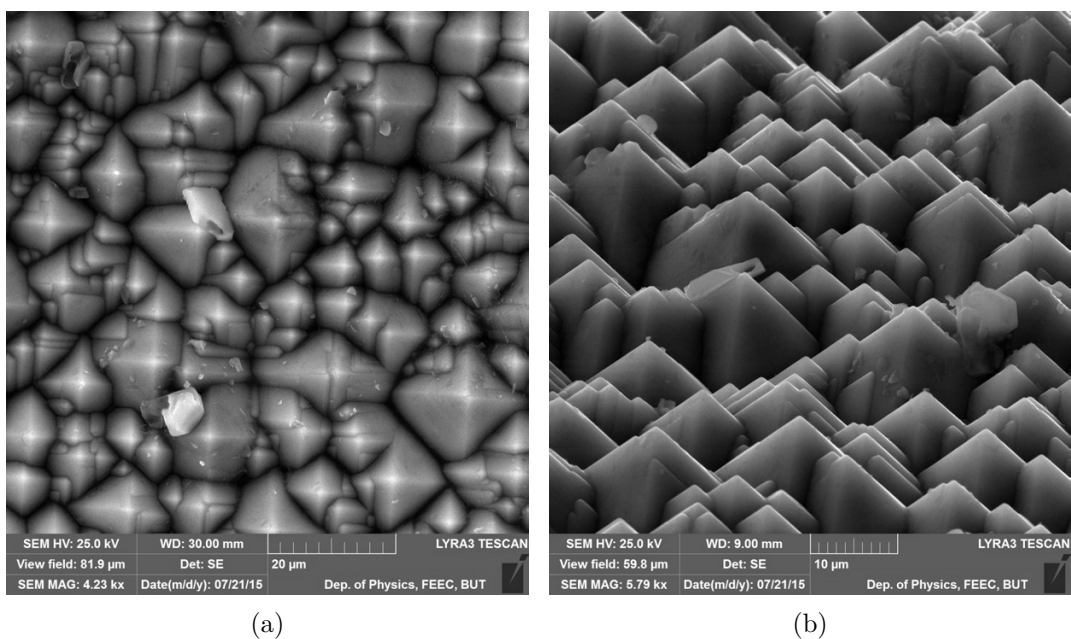
Postup lokalizace a nalezení defektní oblasti, který byl popsán již u předchozího vzorku, je opět stejný, a proto ho již nebudu znovu popisovat. Demonstruji zde pouze naměřené výsledky na tomto vzorku.

Měření vyzařování vzorku vf1a ve viditelném i infračerveném spektru při elektrickém buzení v závěrném směru, $U_R = 4$ V, $I_R = 2,5$ mA, je na obr. 7.15. Z měření na CCD kameře, obr. 7.15a, můžeme pozorovat výrazný objemový defekt, popsáný jako oblast „B“. Tento defekt začínal emitovat přibližně při $U_R = 6$ V, tato prahová hodnota se zvyšující se teplotou vzorku rostla, což indikuje lokální lavinový průraz. Na obr. 7.15b z měření termokamerou můžeme vidět korelaci s měřením CCD kamerou, kde je viditelný značný ohřev v defektní oblasti „B“.

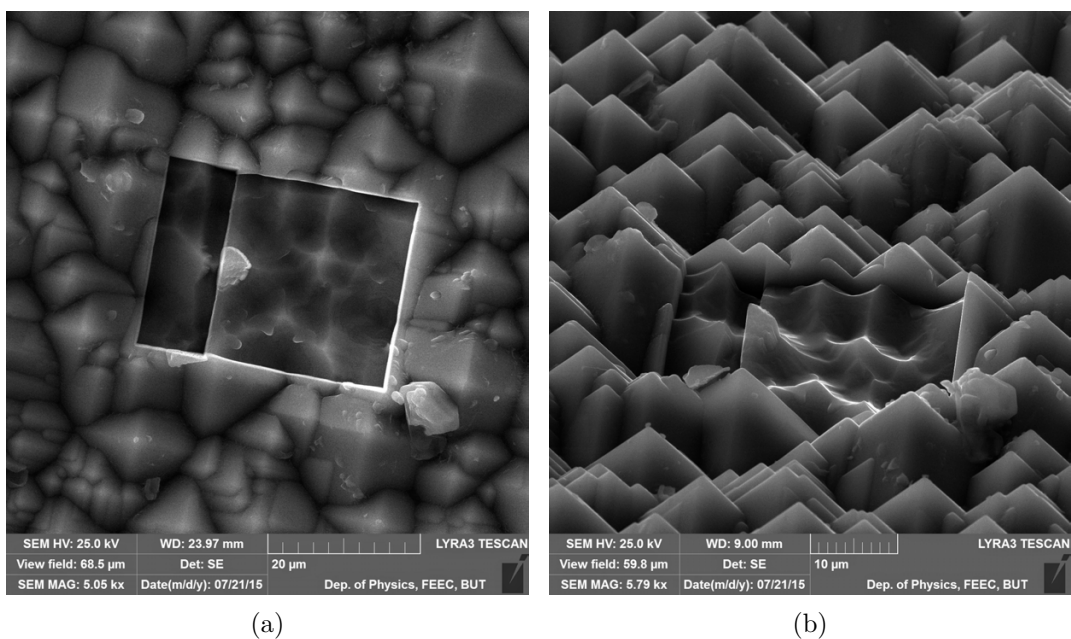


Obr. 7.15: Měření vyzařování ze závěrně polarizovaného vzorku vf1a, $U_R = 4$ V, $I_R = 2,5$ mA: Vyzařování ve viditelném spektru (CCD kamera) (a), Vyzařování v infračerveném spektru (termokamera) (b).

Nalezená problematická oblast „B“ na mikroskopu SEM je ukázána na obr. 7.16. Je zajímavé, že na první pohled se v této oblasti na struktuře neobjevuje žádná porucha struktury. Nicméně když se podíváme na tuto oblast po odprášení iontovým svazkem, obr. 7.17, můžeme vidět v odprášeném místě, že po jedné z pyramid zůstal výběžek v topografii povrchu. To nasvědčuje tomu, že v daném místě byla materiálová nečistota z materiálu, který FIB odprašuje méně než křemík.

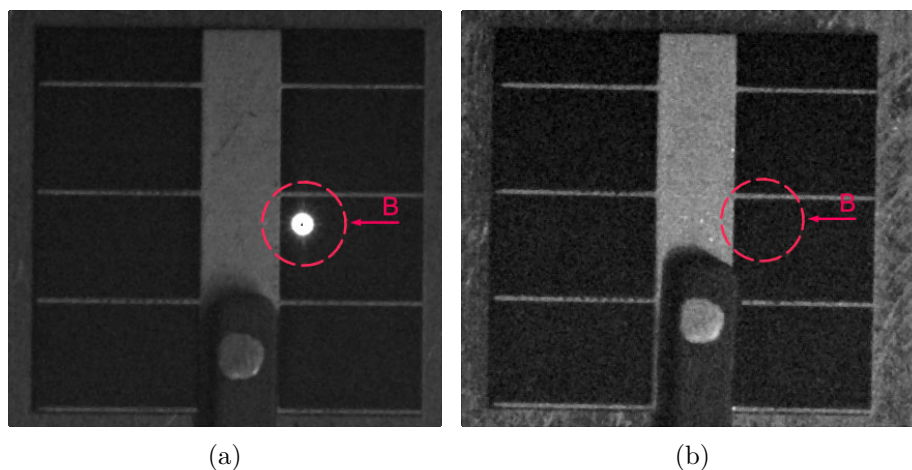


Obr. 7.16: Defektní oblast „B“ vzorku vfla na mikroskopu SEM: pohled shora (a), pohled z úhlu 55° (b).

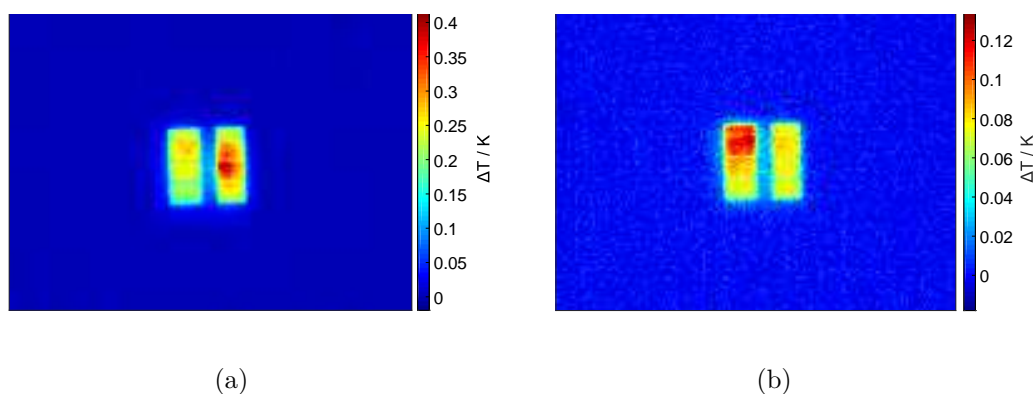


Obr. 7.17: Defektní oblast „B“ vzorku vfla odprášena iontovým svazkem: pohled shora (a), pohled z úhlu 55° (b).

Podívejme se nyní na výsledky měření po iontovém odprášení defektní oblasti „B“ ze vzorku vf1a. Obr. 7.18 znázorňuje stav vyzařování ve viditelném spektru měřeným CCD kamerou při závěrné polarizaci vzorku, $U_R = 4\text{ V}$. Je zřejmé, že vyzařování z defektní oblasti viditelné na obr. 7.18a bylo potlačeno a není na obr. 7.18b při stejném budicím napětí pozorovatelné. Stejný trend lze pozorovat u vyzařování v infračerveném spektru, viz obr. 7.19.

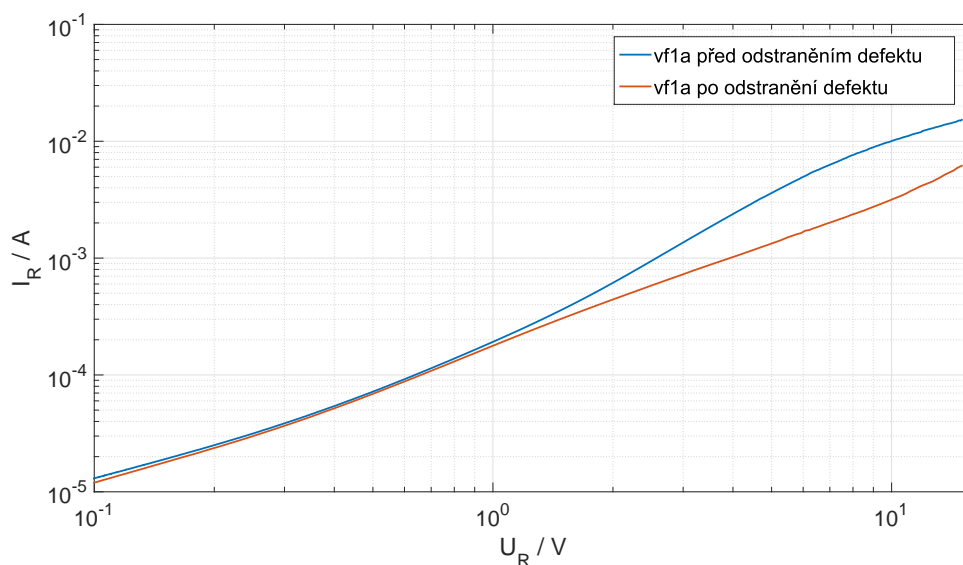


Obr. 7.18: Měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf1a, $U_R = 4\text{ V}$: Vzorek před odprášením defektní oblasti „B“, $I_R = 2,5\text{ mA}$ (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „B“ iontovým svazkem, $I_R = 1\text{ mA}$ (b).



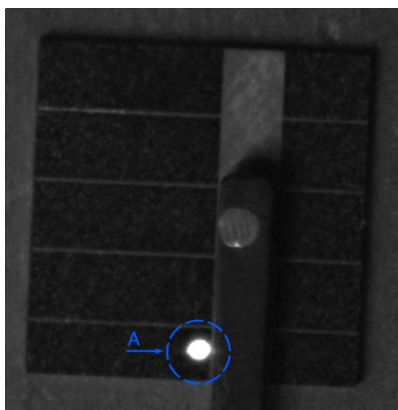
Obr. 7.19: Měření vyzařování v infračerveném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf2a, $U_R = 4\text{ V}$: Vzorek před odprášením defektní oblasti „B“, $I_R = 2,5\text{ mA}$ (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „B“ iontovým svazkem, $I_R = 1\text{ mA}$ (b).

Charakterizace vzorku je opět doplněna měřením závěrné VA charakteristiky v temném prostředí. Toto ilustruje obr. 7.20. Můžeme vidět, že proud článkem v celém měřeném rozsahu po iontovém odprášení defektní oblasti poklesl. Tento pokles je markantnější v oblasti, kde začal být defekt opticky aktivní. Na základě předložených měření opět můžeme tvrdit, že se nám podařilo potlačit vliv defektní oblasti na měřený vzorek solárního článku.

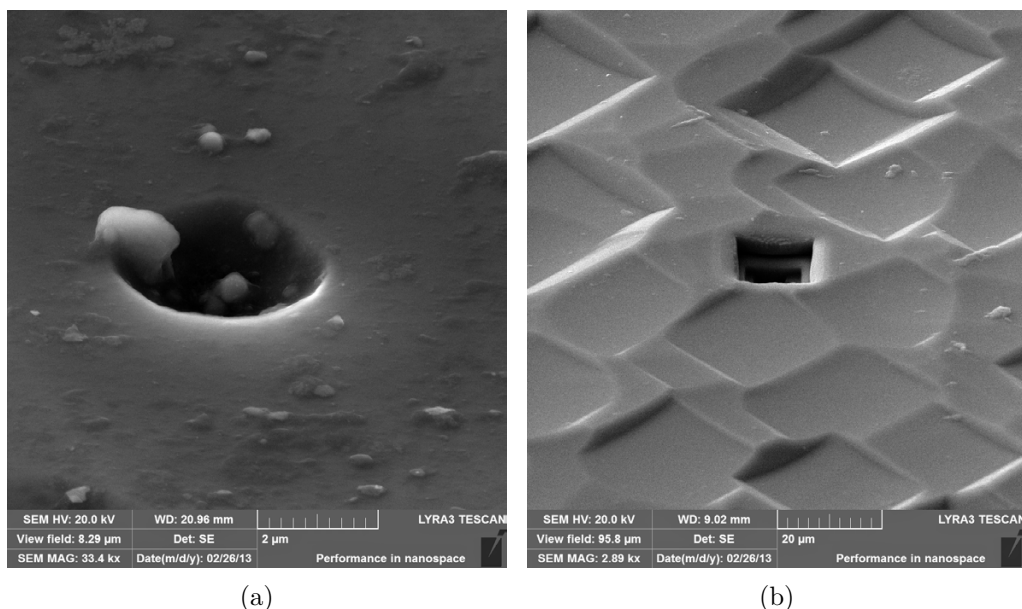


Obr. 7.20: Voltampérová charakteristika vzorku vf1a v závěrném směru, měřeno v temném prostředí, $T = 293,15$ K.

Jako poslední uvedu výsledky z měření vzorku sxx4. Na vzorku sxx4 byl lokalizován defekt (na snímku oblast „A“), který začínal emitovat při závěrném napětí přibližně $U_R = 6,4 \text{ V}$. Snímek z CCD kamery je ukázán na obr. 7.21. Opět zde byla korelace s vyzařováním v infračerveném spektru, kdy defektní oblast vykazovala vysoký ohřev. Snímky z mikroskopu SEM ukazují detail nalezeného defektu, v tomto případě se jednalo o defekt velikosti přibližně $3 \mu\text{m}$. Tento detail je na 7.22a. Odprášená defektní oblast je pak znázorněna na obr. 7.22b.

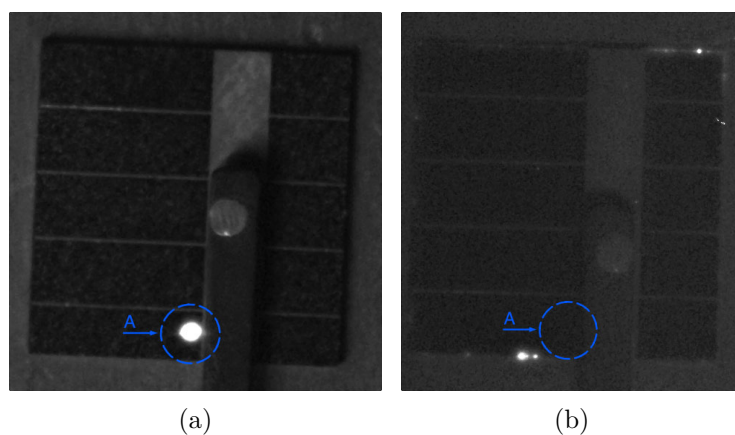


Obr. 7.21: Měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku vf1a, $U_R = 6,4 \text{ V}$, $I_R = 0,7 \text{ mA}$.

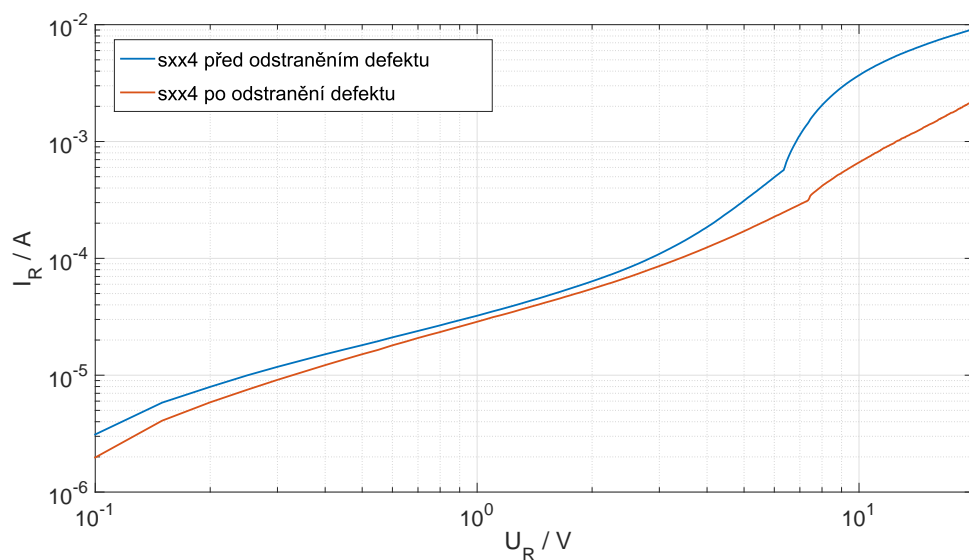


Obr. 7.22: Defektní oblast „A“ vzorku sxx4: detail defetu (a), odprášená defektní oblast (b).

Potlačení vlivu defektu je opět dokumentován snímky z CCD kamery před a po odprášení defektní oblasti iontovým svazkem, viz obr. 7.23. Na závěrné VA charakteristice se pak defekt projevuje prudkou změnou proudu v okolí $U_R = 6,6$ V. Tento prudký nárůst proudu pravděpodobně odpovídá průrazu. Zároveň je na charakteristice 7.24 zřejmé, že tento průraz byl po pasivaci defektu potlačen. V této kapitole



Obr. 7.23: Měření vyzařování ve viditelném spektru ze závěrně polarizovaného vzorku v1a, $U_R = 6,4$ V: Snímek vzorku před odprášení defektní oblasti „A“, $I_R = 0,7$ mA (a), tentýž vzorek po odprášení defektní oblasti „A“ iontovým svazkem, $I_R = 0,18$ mA (b).



Obr. 7.24: Voltampérová charakteristika vzorku sxx4 v závěrném směru, měřeno v temném prostředí, $T = 293,15$ K.

byly prezentovány vybrané výsledky experimentů s technologií FIB. Z předložených výsledků je zřejmé, že při přesném nalezení pozice lokálního defektu, je možno jeho negativní vlivy pomocí odprášení iontovým svazkem potlačit. Je to pravděpodobně způsobeno díky vysokému elektrickému odporu přetvořené oblasti. Měření nasvědčují, že oblast solárního článku, která je odprášena iontovým svazkem, vykazuje vysokou rezistivitu. Nicméně tato měření, nemají zatím dostatečnou opakovatelnost a je zde potřeba vyřešit celou řadu problémů. Největším z nich je nemožnost přesného kontaktování oblastí v řádu jednotek mikrometrů s hroty v kontaktovací stanici, kterou jsem mám k dispozici. V budoucnu by mělo být studium v této oblasti více rozvíjeno a bude potřeba podrobnější rozbor chování přetvořené oblasti a stanovit náhradní modely. Měření rezistivity přetvořeného povrchu by mohlo poskytnout zajímavé informace o jeho chování. Dalším nezbytným úkolem do budoucna je upravení aparatury pro měření zatěžovacích charakteristik, aby šlo nesporně prezentovat vliv odprášení defektů na výkon, a tedy i účinnost solárního článku.

ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ PRÁCE

Předložená dizertační práce prezentuje výsledky výzkumu v oblasti metod nede-
struktivní diagnostiky křemíkových solárních článků. Práce se primárně zaměřuje na
charakterizaci sekundárně vytvořených struktur v PN přechodech křemíkových so-
lárních článků. Sekundárně vytvořenými strukturami jsou především myšleny izolace
pomocí laserových zářezů a odstranění defektní oblasti PN přechodu fokusovaným
svazkem iontů.

Laserové zářezy sloužící především pro izolaci hran křemíkových solárních článků
jsou běžně používány výrobci. Zároveň však prozatím nebyla vydána žádná publi-
kace, která by se zabývala charakterizací těchto laserem vytvořených zářezů. Tato
mezera je vyplněna předloženou prací, která se velkou částí zabývá právě charak-
terizací těchto struktur. Pro charakterizaci byla použita celá řada pokročilých cha-
rakterizačních technik, které jsou zároveň v práci popsány. Jednalo se o metody jak
optické, tak elektrické. Cílem bylo komplexní studium struktury a parametrů kře-
míkových solárních článků a vlivu laserových procesů na jejich vlastnosti. V rámci
tohoto studia bylo dosaženo celé řady výsledků a závěrů, které jsou v práci prezen-
továny, jejich stručný přehled následuje níže.

- Byla navržena a realizována specializovaná metoda měření vyzařování v infra-
červeném spektru ze závěrně polarizovaného solárního článku, která významně
zvýšila citlivost termokamery.
- Byl definován postup přípravy vzorku, kdy jsou realizovány zářezy mezi kon-
takty tak, aby bylo možné určit vlastnosti laserových struktur.
- Byly sledovány jednotlivé vlastnosti laserových zářezů, při různém nastavení
použitého laseru. Bylo ukázáno, že nedostatečně provedené zářezy se jeví jako
množství lokálních defektů a elektricky neizolují.
- Byly popsány laserové struktury vytvořené v PN přechodu solárního článku
a stanoveny jejich elektrické charakteristiky (měření jejich odporu a rezisti-
vity).
- Bylo určeno, že laserem vytvořené struktury, které procházejí PN přechodem
až do substrátu, vykazují homogenní chování a mají především ohmický cha-
rakter.
- Byly stanoveny náhradní modely pro rozložení odporů v oblasti mezi dvěma
sousedními horními kontakty laserově opracovaného článku.
- Byl definován přesný postup měření odporu mezi kontakty, mezi kterými je
realizován laserový zářez a zároveň i měření VA charakteristiky zkoumané
oblasti.
- Na základě měření byly pro ohodnocení kvality laserového opracování stano-

veny dvě veličiny. Veličina A kvantitativně hodnotí kvalitu elektrické izolace dvou částí solárního článku. Veličina B pak kvantitativně ohodnocuje přídatný paralelní odpor připojený k PN přechodu.

Všechny jednotlivé části výzkumu pak vedly ke stanovení komplexní metodiky, která umožňuje vyhodnocení změn parametrů solárního článku v důsledku laserového opracování. Zde je důležité uvést, že významná část prací na této metodice probíhala v rámci projektu Ministerstva průmyslu a obchodu v programu TIP, evidenční číslo FR-TI1/305 „Aplikace laserových technologií do procesu výroby krystalických křemíkových solárních článků“. Metodika byla úspěšně obhájena v rámci tohoto projektu.

Z oblasti využití mikroskopie a především technologie fokusovaného svazku iontů na krystalických křemíkových solárních článcích byl prezentován experiment s odstraňováním defektních oblastí pomocí této technologie. Díky navázání na práci [60] bylo možné nalézt přesnou lokaci defektní oblasti a pokusit se ji pomocí technologie FIB pasivovat. Výsledky z této oblasti jsou opět stručně shrnuty do několika níže uvedených bodů.

- Bylo ověřeno, že pomocí CCD kamery a mikroskopie lze přesně lokalizovat defektní oblasti na různých typech vzorků krystalických křemíkových solárních článků.
- Byl vytvořen postup pro využití technologie FIB pro odstranění PN přechodu v lokalizovaných defektních oblastech.
- Byl stanoven postup pro charakterizaci takto upravených vzorků a byl zjištěn stav před odprašením a po odprašení.
- Byl vyhodnocen vliv vytvořené sekundární struktury technologií FIB na charakteristiky solárního článku.
- Bylo zjištěno, že u odprašených defektních oblastí vše nasvědčuje k potlačení jejich negativního vlivu na funkci solárního článku.

Všechny výsledky v této oblasti výzkumu nasvědčují tomu, že pomocí technologie FIB můžeme potlačit negativní vliv defektních oblastí na funkci krystalických křemíkových solárních článcích jejich odprašením. Je zřejmé, že tato technologie má uplatnění pouze v laboratorních podmínkách, nicméně mohl by se podobný pokus vyzkoušet s laserovou technologií, která by mohla být využívána i průmyslově. To by mohla být perspektivní oblast rozvoje této řešené problematiky. Zároveň bude nutné stanovit náhradní modely pro oblasti modifikované technologií FIB.

Na základě prezentovaných výsledků lze konstatovat, že byly splněny všechny vytyčené cíle této dizertační práce. Je zřejmé, že daná problematika není uzavřena a je zde celá řada oblastí pro další výzkum, ať v oblasti laserových procesů nebo využití fokusovaného svazku iontů.

LITERATURA

- [1] Research Cell Efficiency Records. Březen 2015.
URL <http://www.nrel.gov/ncpv/>
- [2] ABBOTT, M. D.; TRUPKE, T.; HARTMANN, H. P.; aj.: Laser isolation of shunted regions in industrial solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, ročník 15, č. 7, 2007: s. 613–620.
- [3] ABE, T.; HARADA, H.; CHIKAVA, J.: Swirl defects in float-zoned silicon crystals. *Physica B+C*, ročník 116, č. 1-3, Únor 1983: s. 139–147.
- [4] AMETOWABLA, M.; ESTURO-BRETON, A.; KOHLER, J. R.; aj.: Laser processing of crystalline silicon solar cells. In *Photovoltaic Specialists Conference*, leden 2005, s. 1277–1280.
- [5] BAIER, T.; GLAESER, G.; WANKA, H.: Laser Parameters for Silicon Solar Cell Processing: A Simulation of Heat Transfer and Material Modification. In *Laser Material Processing for Solar Energy*, ročník 8743, 2012.
- [6] BAILEY, J.; MC HUGO, S. A.; HIESLMAIR, H.; aj.: Efficiency-Limiting Defects in Silicon Solar Cell Material. *Journal of Electronic Materials*, ročník 25, č. 9, 1996: s. 1417–1421.
- [7] BALAJI, N.; PARK, C.; LEE, Y.; aj.: Rear-side passivation characteristics of Si-rich SiNx for various Local Back Contact solar cells. *Vacuum*, ročník 96, č. 0, 2013: s. 69 – 72, ISSN 0042-207X, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.03.011>.
- [8] BENDA, V.: Fotovoltaické články - historie a současné trendy vývoje. *TZB Haustechnik*, ročník 3, 2010: s. 48–50.
- [9] BHAVSAR, S. N.; ARAVINDAN, S.; VENKATESWARA RAO, P.: A Critical Review on Microtools Fabrication by Focused Ion Beam (FIB) Technology. In *World Congress on Engineering*, ročník 2, 2009, s. 1510–1515.
- [10] BREITENSTEIN, O.: The Physics of Industrial Crystalline Silicon Solar Cells. In *Advances in Photovoltaics: Part 2, Semiconductors and Semimetals*, ročník 89, Elsevier, 2013, s. 1 – 75.
- [11] BREITENSTEIN, O.; LANGENKAMP, M.: *Lock-in Thermography - Basics and Use for Functional Diagnostics of Electronic Components*. Springer, 2003.

- [12] BREITENSTEIN, O.; LANGENKAMP, M.; RAKOTONIAINA, J.; aj.: The imaging of shunts in solar cells by infrared lock-in thermography. In *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2001, s. 1499–1502.
- [13] BROWN, R. A.; WANG, Z.; MORI, T.: Engineering Analysis of Microdefect Formation During Silicon Crystal Growth. *Journal of Crystal Growth*, ročník 225, č. 2-4, Květen 2001: s. 97–109.
- [14] BUDHRAJA, V.: *Influence of Defects and Impurities on Solar Cell Performance*. Dizertační práce, New Jersey Institute of Technology, 2012.
- [15] CARLSON, D. E.: Laser Processing of Solar Cells. In *Laser Material Processing for Solar Energy*, ročník 8473, 2012.
- [16] DOBRZAŃSKI, L. A.; DRYGAŁA, A.; KONIECZNY, J.; aj.: Structure of laser treated multicrystalline silicon wafers. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, ročník Vol. 21, nr 2, 2007: s. 69–72.
- [17] DONOLATO, C.: Theory of Beam Induced Current Characterization of Grain Boundaries in Polycrystalline Solar Cells. *Journal of applied physics*, ročník 54, č. 3, 1983: s. 1314–1322.
- [18] DUENAS, S.; PEREZ, E.; CASTAN, H.; aj.: The Role of Defects in Solar Cells: Control and Detection Defects in Solar Cells. In *Electron Devices (CDE), 2013 Spanish Conference on*, 2013, s. 301–304, doi:10.1109/CDE.2013.6481402.
- [19] EHRHARDT, M.; SCHEIT, C.; RAGNOW, S.; aj.: Fabrication of contact holes by rear side laser ablation of polyimide foils for {CIGS} solar modules. *Applied Surface Science*, ročník 278, č. 0, 2013: s. 219 – 222, ISSN 0169-4332, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.049>.
- [20] ESCOVITZ, W. H.; FOX, T. R.; LEVI-SETTI, R.: Scanning Transmission Ion Microscope with a Field Ion Source. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, ročník 72, 1975, s. 1826–1828.
- [21] FISCHER, B.: *Loss Analysis of Crystalline Silicon Solar Cells using Photoconductance and Quantum Efficiency Measurements*. Dizertační práce, Universität Konstanz, 2003.
- [22] FREY, L.; LEHRER, C.; RYSSEL, H.: Nanoscale Effects in Focused Ion Beam Processing. *Applied Physics A*, Únor 2003: s. 1017–1023.

- [23] FUYUKI, T.; KITTYANAN, A.: Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence. *Applied Physics A*, ročník 96, č. 1, 2009: s. 189–196.
- [24] GIANNUZZI, L. A.; STEVIE, F. A.: *Introduction to Focused Ion Beams: Instrumentation, Theory, Techniques and Practice*. Springer, 2005.
- [25] GOETZBERGER, A.; VOSS, B.; KNOBLOCH, J.: *Crystalline Silicon Solar Cells*. John Wiley & Sons, 1998.
- [26] GREEN, M. A.: Silicon Solar Cells: Evolution, High-efficiency Design and Efficiency Enhancements. *Semiconductor Science and Technology*, ročník 8, č. 1, 1993: s. 1–12.
- [27] GREEN, M. A.: *Silicon Solar Cells: Advanced Principles & Practice*. Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales, 1995, ISBN 9780733409943.
- [28] GREEN, M. A.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; aj.: Solar cell efficiency tables (version 37). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011.
- [29] HALLAM, B.; WENHAM, S.; LEE, H.; aj.: Effect of edge junction isolation on the performance of laser doped selective emitter solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, ročník 95, č. 12, 2011: s. 3557 – 3563, ISSN 0927-0248, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.09.001.
- [30] HAUNSCHILD, J.; BROISCH, J.; REIS, I.; aj.: Quality Control of Czochralski Grown Silicon Wafers in Solar Cell Production Using Photoluminescence Imaging. In *EU PVSEC Proceedings*, 2011, s. 1025–1030.
- [31] HIRST, L. C.; EKINS-DAUKES, N. J.: Fundamental losses in solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, ročník 19, č. 3, 2011: s. 286–293, ISSN 1099-159X.
- [32] HSU, J. W. P.; GRAY, M. H.; XU, Q.: Nanometer Scale Studies of Defects in Semiconductor Films by Near-field Optical Beam Induced Current. In *Defect Recognition and Image Processing in Semiconductors*, ročník 160, 1997, s. 27–36.
- [33] JANDOVA, K.: *Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Dizertační práce, VUT Brno, 2008.
- [34] JULIAN CHEN, C.: *Physics of Solar Energy*. Wiley & Sons, 2011.

- [35] KIENER, D.; C., M.; RESTER, M.; aj.: FIB Damage Of Cu and Possible Consequences for Miniaturized Mechanical Tests. *Materials Science and Engineering: A*, ročník 459, 2007: s. 262 – 272, ISSN 0921-5093.
- [36] KOKTAVÝ, P.; MACKŮ, R.: Noise and Optical Activities of Local Defects in Solar Cells pn Junctions. In *21st International Conference on Noise and Fluctuations*, 2011, s. 409–412.
- [37] KOKTAVÝ, P.; MACKŮ, R.; PARAČKA, P.; aj.: Narrow-band noise as a tool for diagnostics of solar cells pn junctions. In *9th International Conference on Environment and Electrical engineering*, 2010, s. 10–13.
- [38] KOKTAVÝ, P.; MACKŮ, R.; TRČKA, T.; aj.: Study of defect regions local heating in solar cells pn junctions by means of microplasma noise. In *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2010, s. 364–368.
- [39] KRAY, D.; HOPMAN, S.; SPIEGEL, A.; aj.: Study on the edge isolation of industrial silicon solar cells with waterjet-guided laser. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, ročník 91, č. 17, Říjen 2007: s. 1638–1644.
- [40] KU, S.; PIETERS, B.; HAAS, S.; aj.: Electrical characterization of {P3} isolation lines patterned with a {UV} laser incident from the film side on thin-film silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, ročník 108, č. 0, 2013: s. 87 – 92, ISSN 0927-0248, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.09.017>.
- [41] LIBRA, P.; POULEK, V.: Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie. *SVĚTLO*, 2005: s. 32 – 36.
- [42] LUQUE, A.; HEGEDUS, S.: *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2003.
- [43] MACDONALD, D. H.: *Recombination and Trapping in Multicrystalline Silicon Solar Cells*. Dizertační práce, The Australian National University, 2001.
- [44] MACKŮ, R.: *Analýza fluktuačních procesů v solárních člancích*. Dizertační práce, VUT Brno, Brno, 2011.
- [45] MARIEN, J.; PLITZKO, J.; SPOLENAK, R.; aj.: Quantitative Electron Spectroscopic Imaging Studies of Microelectronic Metallization Layers. *Journal of Microscopy*, ročník 194, č. 1, 1999: s. 71–78, ISSN 1365-2818, doi: 10.1046/j.1365-2818.1999.00476.x.
- [46] MARKVART, T.; CASTANER, L.: *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier, 2003.

- [47] MARKVART, T.; CASTANER, L.: Principles of Solar Cell Operation. In *Solar Cells (Second Edition)*, Elsevier, 2013, ISBN 978-0-12-386964-7, s. 3 – 25.
- [48] MILES, R. W.; ZOPPI, G.; FORBES, I.: Inorganic photovoltaic cells. *Materials Today*, ročník 10, č. 11, 2007: s. 20 – 27, ISSN 1369-7021, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70275-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70275-4).
- [49] MÜLLER, E. W.; TSONG, T. T.: *Field Ion Microscopy Principles and Applications*. Elsevier, 1969.
- [50] MUNROE, P.: The Application of Focused Ion Beam Microscopy in the Material Sciences. *Materials Characterization*, ročník 60, č. 1, 2009: s. 2 – 13, ISSN 1044-5803.
- [51] ORLOFF, J.; SWANSON, L.; UTLAUT, M.: *High Resolution Focused Ion Beams: FIB and its Applications*. Springer, 2003.
- [52] ORLOFF, J.; SWANSON, L. W.; UTLAUT, M.: Fundamental limits to imaging resolution for focused ion beams. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, ročník 14, č. 6, 1996: s. 3759–3763.
- [53] PARAČKA, P.; KOKTAVÝ, P.; MACKŮ, R.: PN junction defects detection in solar cells using noise diagnostics. *Key Engineering Materials*, ročník 465, č. 1, 2011: s. 359–362.
- [54] PREWITT, P. D.; MAIR, G. L. R.: *Focused Ion Beams from Liquid Metal Ion Sources*. John Wiley, 1987.
- [55] REYNTJENS, S.; PUERS, R.: A Review of Focused Ion Beam Applications in Microsystem Technology. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, ročník 11, č. 4, 2001: s. 287 – 300.
- [56] RUBANOV, S.; MUNROE, P. R.: FIB-Induced Damage in Silicon. *Journal of Microscopy*, ročník 214, Červen 2004: s. 213–221.
- [57] SALIMONOVÁ, K. V.: *Fyzika polovodičů*. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatury, 1978.
- [58] SINTON, R. A.; CUEVAS, A.: Contactless determination of current–voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data. *Applied Physics Letters*, ročník 69, č. 17, 1996: s. 2510–2512, doi:[10.1063/1.117723](https://doi.org/10.1063/1.117723).

- [59] SIVEL, V. G. M.; VAN DEN BRAND, J.; WANG, W. R.; aj.: Application of The Dual-beam Fib/sem to Metals Research. *Journal of Microscopy*, ročník 214, č. 3, 2004: s. 237–245, ISSN 1365-2818.
- [60] SKARVADA, P.: *Lokální optické a elektrické charakteristiky optoelektronických součástí*. Dizertační práce, VUT Brno, 2012.
- [61] SKARVADA, P.; TOMANEK, P.; GRMELA, L.; aj.: Microscale Localization of Low Light Emitting Spots in Reversed-biased Silicon Solar Cells. *SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS*, ročník 94, č. 12, 2010: s. 2358–2361.
- [62] SMITS, F.: Measurement of Sheet Resistivities With The Four-point Probe. *Bell System Technical Journal, The*, ročník 37, č. 3, May 1958: s. 711–718, ISSN 0005-8580, doi:10.1002/j.1538-7305.1958.tb03883.x.
- [63] SZE, S.: *Semiconductor Devices Physics and Technology*. Wiley & Sons, 2002.
- [64] TACHIBANA, T.; SAMESHIMA, T.; KOJIMA, T.; aj.: Evaluation of Defects Generation in Crystalline Silicon Ingot Grown by Cast Technique with Seed Crystal for Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, ročník 111, č. 7, 2012: 074505, doi:http://dx.doi.org/10.1063/1.3700250.
- [65] TIEDJE, T.; YABLONOVITCH, E.; CODY, G.; aj.: Limiting efficiency of silicon solar cells. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, ročník 31, č. 5, May 1984: s. 711–716, ISSN 0018-9383.
- [66] TOMÁNEK, P.; ŠKARVADA, P.; GRMELA, L.: Local optical and electric characteristics of solar cells. In *9th International Conference on Correlation Optics*, 2010, str. 73880L1.
- [67] TORRES, R.; ITINA, T. E.; VERVISCH, V.; aj.: Study On Laser-Induced Periodic Structures And Photovoltaic Application. *AIP Conference Proceedings*, ročník 1278, č. 1, 2010: s. 576–581, doi:http://dx.doi.org/10.1063/1.3507149.
- [68] TOUŠEK, J.; TOUŠKOVÁ, J.: Perspektiva využití fotovoltaických článků pro přeměnu sluneční energie. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, ročník 36, č. 4, 1991: s. 217–237.
- [69] VOLKERT, C. A.; MINOR, A. M.: Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining. *MRS Bulletin*, ročník 32, 5 2007: s. 389–399, ISSN 1938-1425, doi: 10.1557/mrs2007.62.

- [70] WENHAM, S. R.; GREEN, M. A.: Silicon Solar Cells. *Progres in photovoltaics: Research and Applications*, ročník 4, 1996: s. 3–33.
- [71] XU, X.; DELLA RATTA, A. D.; SOSONKINA, J.; aj.: Focused ion beam induced deposition and ion milling as a function of angle of ion incidence. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, ročník 10, č. 6, 1992: s. 2675–2680.
- [72] YACOBI, B. G.: *Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [73] YORDANOV, G.; MIDTGARD, O. M.: Physically-consistent Parameterization in The Modeling of Solar Photovoltaic Devices. In *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, June 2011, s. 1–4.

Autorské a spoluautorské publikace

Články v odborném periodiku impaktovaném:

ŠKARVADA, P.; TOMÁNEK, P.; KOKTAVÝ, P.; MACKŮ, R.; ŠICNER, J.; VON-DRA, M.; DALLAEVA, D.; SMITH, S.; GRMELA, L. A variety of microstructural defects in crystalline silicon solar cells. *Applied Surface Science*, 2014, roč. [312], č. [312], s. 50–56. ISSN: 0169-4332.

Články indexované v databázích WoS a Scopus:

ŠICNER, J.; ŠKARVADA, P.; MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P. Study of the Influence of Structural Defects on Properties of Silicon Solar Cells. *Key Engineering Materials (print)*, 2014, roč. 592–593, č. 1, s. 449–452. ISSN: 1013-9826.

MACKŮ, R.; ŠICNER, J.; HOLCMAN, V.; KOKTAVÝ, P. Mechanical Induced Defects and Fractures in the Silicon Solar Cell Structure. *Key Engineering Materials (print)*, 2014, roč. 592–593, č. 1, s. 533–536. ISSN: 1013-9826.

ŠKARVADA, P.; TOMÁNEK, P.; ŠICNER, J. Influence of localized structural defects on the pn junction properties. *Key Engineering Materials (print)*, 2014, roč. 592–593, č. 1, s. 441–444. ISSN: 1013-9826.

ŠICNER, J.; MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P.; HOLCMAN, V. Noise and Local Diagnostics of Laser Notches on Silicon Solar Cells. In *22nd International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF)*, 2013, s. 1–4. ISBN: 978-1-4799-0670-3.

MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P.; TRČKA, T.; ŠICNER, J.; HOLCMAN, V.; SADOVSKÝ, P. Analysis of excess noise sources in concrete composite materials and impact on electromagnetic emission measurement. In *22nd International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF)*, 2013, s. Th-P-12-1 ISBN: 978-1-4799-0670-3.

Články v neimpaktovaném odborném periodiku:

MACKŮ, R.; ŠICNER, J.; KOKTAVÝ, P.; TRČKA, T. Fracture related electromagnetic emission measurement and excess noise analysis of reinforced composites. *Procedia Materials Science*, 2014, roč. 2014, č. 3, s. 116–121. ISSN: 2211-8128.

ŠICNER, J.; KOKTAVÝ, P.; DALLAEVA, D. Identification of Micro- scale Defects in Crystalline Solar Cell Structure. In *Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety*, 2012, s. 532–539. ISBN: 978-5-905576-18-8.

MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P.; ŠICNER, J. Comprehensive study of solar cell structure defects by means of noise and light emission analysis. *Advances in Electrical and Electronic Engineering - internetový časopis*, 2012, roč. 10, č. 2, s. 6–11. ISSN: 1804-3119.

Články v konferenčních sbornících:

ŠICNER, J. Influence of Laser Processing on Parameters of Silicon Solar Cells. In *Proceedings of the 20th conference volume 3*, 2014, s. 175–179. ISBN: 978-80-214-4922-0.

ŠKARVADA, P.; TOMÁNEK, P.; ŠICNER, J. Influence of localized structure defects on the pn junction properties *Brno: VUTIMUM*, 2013, s. 203–203. ISBN: 978-80-214-4739-4.

MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P.; ŠICNER, J.; HOLCMAN, V. Mechanical Induced Defects and Fractures in the Silicon Solar Cell Structure *Brno: VUTIMUM*, 2013, s. 216–216. ISBN: 978-80-214-4739-4.

ŠKARVADA, P.; KOKTAVÝ, P.; SMITH, S.; MACKŮ, R.; ŠICNER, J.; VONDRA, M.; DALLAEVA, D.; TOMÁNEK, P.; GRMELA, L. Microstructure defects in silicon solar cells. In *Proceedings of 8th Solid state surfaces and interfaces.*, 2013, s. 168–169. ISBN: 978-80-223-3501-0.

ŠICNER, J. Optical and Thermal Activities of Micro-Sized Local Defects on the Edges of Silicon Solar Cells. In *proceedings of the 16th conference student eeict 2012 vol. 3.*, 2012, roč. 3, s. 288–292. ISBN: 978-80-214-4462-1.

ŠICNER, J.; MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P. Micro-sized local defects on the edge of silicon solar cells and their optical and thermal characteristics. In *New trends in physics Proceedings of the conference*, 2012, s. 73–76. ISBN: 978-80-214-4594-9.

MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P.; ŠICNER, J. Investigation of solar cell performance studied by local breakdowns and related noise. In *Electronic Devices and Systems 2012.*, 2012, s. 267–272. ISSN: ISBN: 978-80-214-4539-0.

ŠICNER, J.; KOKTAVÝ, P.; MACKŮ, R. Micro-sized local defects on the edge of silicon solar cells. In *Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2012*, 2012, s. 95–100. ISBN: 978-80-214-4539-0.

Curriculum Vitæ

Ing. Jiří Šicner

Osobní informace

Datum narození: 22. 06. 1987
Místo narození: Zlín
Národnost: Česká
Stav: Svobodný
Adresa: Hložkova 1375, 765 02 Otrokovice
Telefon: +420 737 843 347
E-mail: jiri.sicner@gmail.com

Vzdělání

2011–nyní Vysoké Učení Technické v Brně, Ph.D.
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Obor: Fyzikální elektronika a nanotechnologie
Téma dizertační práce: Charakterizace sekundárně vytvořených struktur v PN přechodech křemíkových solárních článků

2009–2011 Vysoké Učení Technické v Brně, Ing.
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Obor: Telekomunikační a informační technika
Téma diplomové práce: Srovnání algoritmů dekódování Reed - Solomonova kódu

2006–2009 Vysoké Učení Technické v Brně, Bc.
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Obor: Teleinformatika
Téma bakalářské práce: Realizace dekodérů konvolučních kódů

2002–2006 Střední průmyslová škola Zlín
Obor: Technické lyceum

Pracovní zkušenosti

- 2011–nyní Technicko hospodářský pracovník, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav fyziky.
- 2014–nyní Technicko hospodářský pracovník (Středoevropský technologický institut VUT, projekt Optoelektronická charakterizace nanostruktur).

Projekty řešené autorem

- 2011–2012 GAP102/10/2013, *Flukтуаční procesy v PN přechodech solárních článků*, hlavní řešitel: prof. Ing. Pavel Koktavý, CSc., Ph.D.
- 2011–2013 FR-TI1/305, *Aplikace laserových technologií do procesu výroby krystalických křemíkových solárních článků*, hlavní řešitel: prof. Ing. Pavel Koktavý, CSc., Ph.D.
- 2012–2012 FEKT-S-14-2352, *Diagnostika defektů v materiálech za použití nejnovějších defektoskopických metod*, hlavní řešitel: doc. Ing. Karel Liedermann, CSc.
- 2012–nyní ED2.1.00/03.0072, *Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)*, hlavní řešitel: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.
- 2012–2013 FEKT-S-11-11, *Diagnostika defektů v materiálech pro elektroniku*, hlavní řešitel: doc. Ing. Karel Liedermann, CSc.
- 2014–nyní FEKT-S-14-2240, *Rozvoj pokročilých metod pro diagnostiku elektrotechnických materiálů a součástek*, hlavní řešitel: doc. Ing. Petr Sedlák, Ph.D.

Uvedené informace jsou platné k datu 22. 8. 2015.